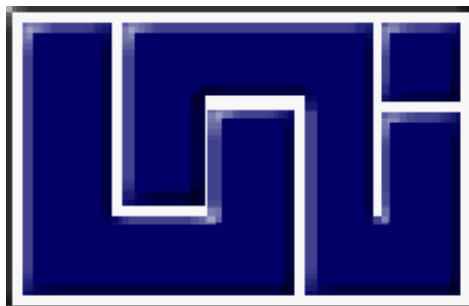


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA



**APLICACIÓN DE LOS LODOS DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES DE LA COMPAÑÍA CERVECERA DE NICARAGUA**

TRABAJO DE TESIS PRESENTADO POR:

Br. Sheyla Palacios González

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

TUTOR

MSc. Ing. Larisa Korsak

MANAGUA, NICARAGUA
Septiembre, 2007

OPINION DEL CATEDRATICO GUIA

El trabajo de Diploma titulado "**Aplicación de los Lodos del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de la Compañía Cervecera de Nicaragua.**" realizado por la bachiller Sheyla Palacios González, es un trabajo que tiene amplio componente experimental con un claro enfoque práctico. Br. Palacios en su tesis presenta alternativas de uso de los lodos generados en la cervecería, demostrando como un desecho, producto indeseable puede ser convertido en el material útil.

El trabajo es de gran importancia para el Medio Ambiente, ya que proporciona una opción para la reducción de los contaminantes liberados al medio y por ende disminuye el impacto ambiental de la empresa cervecera.

Durante la realización de la tesis, la bachillera demostró excelente dominio de prácticas experimentales en laboratorio, mucha iniciativa e ingenio, para poder desarrollar algunos procedimientos nuevos basándose en las normas existentes.

Como catedrático guía considero que el trabajo es de alta calidad técnica y científica, por lo que solicito a los honorables miembros del tribunal examinador evaluar este gran esfuerzo y otorgar a la Br. Sheyla Palacios González el titulo de Ingeniero Químico.

ING. LARISA KORSAK
Tutora del estudio, FIQ

AGRADECIMIENTO

La realización de esta Tesis Monográfica fue posible gracias al Apoyo Científico y Moral de mi tutora Ing. Larisa Korsak, al Apoyo Moral de mis Familiares; así como también al Apoyo Económico del Programa UNI-SAREC-FIQ, la Facultad de Ingeniería Química y la Dirección de Atención Estudiantil.

Agradezco muy cordialmente a cada una de las personas que de alguna u otra manera colaboraron con la elaboración de esta tesis, haciendo mención especial a las siguientes personas: Ing. Luis Porras, Ing. Indiana García, Ing. Martha Benavente, Ing. Silvio Rojas, Ing. Sandra Castro, Sr. Rudy Arias.

DEDICATORIA

Dedico mi título como Ing. Químico adquirido mediante la realización de ésta Tesis Monográfica a:

Mi Madre, quien desde que me vio nacer me ha acompañado, protegido y dedicado su vida para asegurar el bienestar de la mía.

Mi Esposo, quien me ha amado y apoyado en cada momento desde el instante en que nos conocimos.

Mi Hijo, quien se ha convertido en la luz de mi vida y quien es la razón principal de mi deseo de preparación profesional.

Sheyla Palacios González.

RESUMEN

La tesis monográfica “Aplicación de los Lodos del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de la Compañía Cervecera de Nicaragua”, tiene como objetivo principal determinar las alternativas de uso para dichos lodos.

Se realizaron una serie de análisis con el fin de caracterizar física, química y biológicamente el lodo en estudio. Las características determinadas se utilizaron para evaluar dos posibles alternativas de aplicación, a) aplicación como abono orgánico y b) aplicación como materia prima de materiales de construcción.

Se encontró que los lodos en estudio poseen las características adecuadas para su aplicación como abono orgánico, pero de acuerdo a sus concentración de patógenos y parásitos los “Estándares para el Uso y Disposición de Lodos de Aguas Residuales” de la EPA, clasifican estos lodos como Clase B, lo que indican que requieren ser sometidos a una estabilización previa a su aplicación como abono orgánico.

Otra limitación encontrada para la aplicación de los lodos como abono orgánicos fue la concentración de los metales Arsénico y Mercurio por encima de las normas de la EPA.

Los lodos de la CCN podrán ser aplicados como abono orgánico una vez que se consiga la eliminación de patógenos y metales para cumplir con los estándares de la EPA. Se recomienda la estabilización alcalina para la eliminación de patógenos y la evaluación de un método para disminuir el contenido de Arsénico y Mercurio en los lodos.

Se comparó también las características físicas y químicas encontradas en lodos con las de la arcilla, con el fin de evaluar el potencial de aplicación del lodo como materia prima de materiales de construcción. Se llegó a la conclusión de que lodos en estudio no pueden actuar como sustituto total de las arcillas en los materiales de construcción.

Se elaboraron ladrillos a escala de laboratorio a partir de distintas proporciones de lodo y arcilla, en cada ladrillo se determinó su Porcentaje de Absorción de Humedad y su Resistencia a la Compresión. Mediante estos parámetros se concluyó que en una mezcla de 10% lodo y 90% arcilla se consigue la fabricación de un ladrillo macizo de tipo estructural y no estructural con características aceptables.

TABLA DE CONTENIDO

<i>Contenido</i>	<i>Página</i>
AGRADECIMIENTO	I
DEDICATORIA	II
RESUMEN	III
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	3
III. MARCO TEÓRICO.....	4-
3.1 MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES	4
3.1.1 PRETRATAMIENTO	5
3.1.2 TRATAMIENTO PRIMARIO	5
3.1.3 TRATAMIENTO SECUNDARIO	5
3.1.4 TRATATAMIENTO TERCIARIO.....	5
3.2 SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CCN	6
3.2.1 GENERALIDADES	6
3.2.2 PRETRATAMIENTO	6
3.2.3 TRATAMIENTO PRIMARIO	6
3.2.4 TRATAMIENTO SECUNDARIO	7
3.2.5 TRATATAMIENTO TERCIARIO.....	9
3.2.6 LODOS RESIDUALES.....	9
3.3 ORIGEN Y NATURALEZA DE LOS VERTIDOS DE UNA CERVECERÍA	10
3.4 TRATAMIENTO DE LODOS	11
3.4.1 ESTABILIZACIÓN.....	11
3.4.2 ACONDICIONAMIENTO	14
3.4.3 DESHIDRATACIÓN.....	14
3.4.4 INCINERACIÓN	15
3.5 APLICACIÓN DE LOS LODOS DE PTAR	16
3.5.1 APLICACIÓN DE LODOS COMO ABONOS ORGÁNICOS Y MEJORADORES DE SUELO.....	16
3.5.1.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL LODO PARA SU APLICACIÓN COMO ABONO	16
3.5.1.2 SELECCIÓN DEL LUGAR DE APLICACIÓN.....	20
3.5.2 APLICACIÓN DE LOS LODOS COMO MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN ...	21
3.5.2.1 PROCESOS DE SOLIDIFICACIÓN TÉRMICA.....	21
3.5.2.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS LODOS PARA SU APLICACIÓN COMO MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.....	25

IV.	METODOLOGÍA.....	30
V.	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	33
VI.	CONCLUSIONES	45
VII.	RECOMENDACIONES.....	46
VIII.	ABREVIATURAS	47
IX.	BIBLIOGRAFÍA	48
X.	ANEXOS	

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla</i>	<i>Página</i>
Tabla 3.1: Nivel de tratamiento del agua residual	4
Tabla 3.2: Distancias a las áreas de aplicación en el suelo, según los emplazamientos	21
Tabla 3.3: Composición promedio de óxidos en lodos de aguas residuales y arcillas	26
Tabla 3.4: Valores para evaluar el índice de plasticidad	27
Tabla 3.5: Calidad de los ladrillos de lodo de acuerdo a la absorción de agua y su resistencia a la compresión	29
Tabla 4.1: Análisis de Laboratorio Realizados a los Lodos.....	31
Tabla 5.1: Resultados de los Análisis de Sólidos	33
Tabla 5.2: Resultados de los Análisis de Patógenos y Parásitos en Cada uno de los Muestras Realizados	35
Tabla 5.3: Resultados de los Análisis de Nutrientes y Macronutrientes en los Lodos de la CCN y Concentración Típica en Lodos y Fertilizantes	36
Tabla 5.4: Resultados de los Análisis de Metales Pesados y Concentraciones Límites Aceptadas.....	37
Tabla 5.5: Resultados de los Análisis de Óxidos en los Lodos en Estudio y Concentraciones Típicas en Arcillas.....	38
Tabla 5.6: Resultados de los Análisis Realizados a los Ladrillos Elaborados a Partir de las Distintas Mezclas Lodo/Arcilla	40

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura</i>	<i>Página</i>
Figura 3.1: Dosis típica de cal para la estabilización de lodos	12
Figura 3.2: (a) Conglomerados ligeros a partir de lodos, (b) Adoquines fabricados con conglomerados ligeros	22
Figura 3.3: Producto final del proceso de escoria	23
Figura 3.4: Ladrillos a partir de lodos	24
Figura 5.1: Contenido de Sólidos en el Lodo	34
Figura 5.2: Representación Gráfica de la Fluctuación del pH entre los distintos eventos de muestreo	35
Figura 5.3: Representación Gráfica de los Resultados Obtenidos de lo Análisis de Metales Pesados en los Lodos y Concentraciones Límites	37
Figura 5.4: Representación Gráfica de los Resultados Obtenidos de los Análisis de Óxidos en los Lodos y Concentraciones Típica en Arcillas.....	39
Figura 5.5: Fotografía de las piezas fabricadas con 100% lodos, luego de la etapa de secado.....	39
Figura 5.6: Tendencia de la Contracción Lineal del Ladrillo con Respecto a la Relación Lodo/Arcilla.....	41
Figura 5.7: Tendencia del Absorción de Agua del Ladrillo con Respecto a la Relación Lodo/Arcilla.....	42
Figura 5.8: Tendencia de la Resistencia a la Compresión del Ladrillo con Respecto a la Relación Lodo/Arcilla.....	43
Figura 5.9: Relación de la Absorción de Humedad y la Resistencia a la Compresión con Respecto a la Relación Lodo/Arcilla	44

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua como fenómeno ambiental de importancia, se inicia desde los primeros intentos de la industrialización, para transformarse en un problema generalizado, a partir de la revolución industrial a comienzos del siglo XIX.

Con el desarrollo de la industrialización, la intensificación de la agricultura y la multiplicación de la población a nivel mundial, la demanda de agua, los caudales y concentraciones de las aguas residuales han ido aumentando, las vías fluviales naturales constituyen conductos de eliminación baratos y siempre disponibles. Las aguas residuales que se vacían en corrientes naturales, lagos, esteros, ríos, etc., producen una contaminación que puede ser peligrosa para la salud, generar condiciones desagradables u ofensivas para la comunidad o crea problemas urbanísticos en las zonas adyacentes.

Para reducir la contaminación que provocan las aguas residuales, se requiere someterlas a un proceso especial en plantas de tratamiento. Pero la depuración de las aguas residuales también genera residuos indeseables conocidos como lodos o fangos, los cuales son un concentrado de contaminación y cuyas características son consecuencia del uso que se le haya dado a las aguas. El tratamiento y disposición de lodos es actualmente el mayor problema en las plantas de tratamiento de aguas residuales (Romero, 1999).

Los lodos generados en procesos de tratamiento de aguas residuales representan una enorme cantidad de biomasa potencialmente valiosa. Si los lodos son tratados adecuadamente, para que cumplan con los límites máximos permisibles de contaminantes, pueden aprovecharse sus características de diferentes maneras.

Antes de planificar un adecuado método de disposición de los lodos o posible aprovechamiento de los mismos, es necesario conocer sus características, ya que es bien sabido que estos lodos son ricos en nutrientes pero tienden a concentrar trazas de metales pesados y compuestos orgánicos poco biodegradables (productos químicos utilizados durante la limpieza de equipos, etc.) dependiendo del uso que se le haya dado al agua, también existe la posibilidad de presencia de organismos patógenos, lo cual limita su aprovechamiento inmediato.

En Nicaragua, la creciente preocupación por la preservación de nuestro medio ambiente, además de la aprobación del decreto 33-95 en el año 1995; el cual tiene por objeto fijar los valores máximos permisibles o rangos de los vertidos líquidos generados por las actividades domésticas, industriales y agropecuarias que se descargan a las redes de alcantarillado sanitario y cuerpos receptores; ha tenido como consecuencia que la descarga de aguas residuales crudas doméstica e industrial en los distintos cuerpos de aguas, haya disminuido y con ello aumentado el volumen de lodos generados a nivel del país.

Actualmente en Nicaragua, la evacuación de estos lodos no representa un problema de contaminación, pero a medida que aumenten la cantidad de plantas de tratamiento de aguas residuales del país y con la futura construcción de una planta de tratamiento para las aguas residuales domésticas de la ciudad de Managua, el problema de evacuación de lodos se hará más evidente.

La Compañía Cervecera de Nicaragua cuenta desde el año 2001 con un sistema de tratamiento de aguas residuales localizado a 500 m del lago Xolotlán, siendo una de las industrias pioneras en el área de tratamiento de sus aguas residuales. En dicha planta de tratamiento se tratan los efluentes de las distintas operaciones de la planta procesadora de cerveza, así como las aguas negras del área administrativa.

Se estima que la generación diaria de lodos del sistema de tratamiento de aguas residuales de la Compañía Cervecera de Nicaragua es de 3m^3 (CCN), estos lodos son compactados y recolectados en contenedores para luego ser utilizados como abonos en las áreas verdes de la compañía; sin embargo, hasta la fecha no se ha realizado ninguna caracterización de estos lodos para conocer su verdadero valor como abono o con el objetivo de encontrar otro método de disposición o posible aprovechamiento comercial de los mismos.

Mediante la elaboración de la tesis denominada “Aplicación de los lodos del sistema de tratamiento de aguas residuales de la Compañía Cervecera de Nicaragua”, se analizaron las características fisicoquímicas y la presencia de contaminantes dañinos para el medio ambiente en los lodos generados en dicha planta, con el fin de proponer un adecuado método de disposición o posible aprovechamiento de los mismos.

Esta investigación es uno de los primeros pasos para crear una cultura de aprovechamiento de lodos en Nicaragua.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Determinar alternativas de uso de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Compañía Cervecera de Nicaragua.

2.2 Objetivos Específicos

- 2.2.1 Caracterizar la calidad de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Compañía Cervecera de Nicaragua.
- 2.2.2 Seleccionar las alternativas viables para el uso de los lodos de la CCN.
- 2.2.3 Comprobar la aplicación de los lodos de acuerdo a las alternativas seleccionadas.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES

Los constituyentes presentes en el agua residual se remueven por mecanismos de tipo físico, químico y biológico. Los métodos se clasifican por lo general en operaciones físicas unitarias, procesos químicos unitarios y procesos biológicos unitarios. En los sistemas de tratamiento se realizan combinaciones de estas operaciones y procesos.

Los términos empleados con frecuencia en la literatura para describir los niveles de tratamiento se presentan en la Tabla 3.2 (Baldizón, 2002).

Tabla 3.1.- Nivel de tratamiento del agua residual

Nivel de Tratamiento	Proceso	Objetivo de Remoción	Tipo de Tratamiento
Preliminar	Físico	Sólidos suspendidos y material flotante grueso	<ul style="list-style-type: none"> • Rejas • Tamices • Trituradores • Cajas de Arena • Retención de grasa • Homogenizadores • Reguladores de caudal
Primario	Proceso Físico, químicos y bioquímicos	Sólidos en suspensión, sedimentables, grasas y sustancias disueltas en general	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentadores primarios • Sistemas de Flotación • Neutralización • Precipitación • Oxidación • Fosas Sépticas • Tanques Imhoff
Secundario	Tratamiento biológico y/o bioquímico	Remoción de materia orgánica disuelta y en suspensión biodegradable y nutrientes	<ul style="list-style-type: none"> • Lagunas de Estabilización • Zanjas de Oxidación • Filtros Biológico • UASB • FAFA
Terciario	Tratamiento químico y/o bioquímico	Remoción de materia orgánica e inorgánica disuelta y eliminación de patógenos	<ul style="list-style-type: none"> • Coagulación • Floculación • Descarbonatación • Ablandamiento • Precipitación • Desinfección • Biofiltro y lagunas con macrofitas

3.1.2 Pretratamiento

El tratamiento preliminar ocurre a través de una secuencia de unidades de tratamiento encargadas de modificar la distribución del tamaño de las partículas presentes en el agua residual. El tratamiento preliminar constan de tamizado grueso, dilaceración, remoción de arenas, remoción de grasas y aceites, homogenización de caudales y remoción de sólidos suspendidos totales (Crites y Tchobanoglous, 2000).

3.1.3 Tratamiento Primario

Tienen el propósito de remover materia en suspensión y flotante. El sistema más común es un sedimentador que bajo buenas condiciones de operación, pueden remover hasta el 60% de los sólidos en suspensión, y el 30% de la DBO. No será capaz de remover suspensiones coloidales ni sólidos disueltos, para los que se necesita un tratamiento secundario (Baldizón, 2002).

En la mayoría de los casos, el objetivo principal es la obtención de un efluente clarificado, pero también es necesario producir un lodo cuya concentración de sólidos permita su fácil tratamiento y manejo. Los decantadores son unidades de tratamiento primario destinadas a remover sólidos sedimentables que incluyen pocas partículas granulares y muchas floculentas.

3.1.4 Tratamiento Secundario

Una vez eliminados de un 40 a 60% de los sólidos en suspensión y reducida de un 20 a un 40% la DBO por medio físicos en el tratamiento primario, el tratamiento secundario reduce la concentración de materia orgánica en el agua (Baldizón, 2002).

Para líquidos domésticos generalmente se usan procesos biológicos, un tratamiento biológico de aguas residuales consiste básicamente en aclimatar una flora bacteriana que utilice la materia orgánica como alimento, convirtiéndola en gases como el CO₂, que escapan a la atmósfera y en tejido celular de las bacterias, que puede ser removido por sedimentación.

3.1.5 Tratamiento Terciario

El tratamiento terciario constituye un complemento a la depuración del agua residual. Los diferentes tratamientos empleados persiguen: reducir los sólidos en suspensión y la parte orgánica asociada, reducir la DBO y DQO solubles, reducir el contenido de fósforo y/o nitrógeno, eliminar microorganismos patógenos, eliminar detergentes o tóxicos no biodegradables.

3.2 SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA COMPAÑÍA CERVECERA DE NICARAGUA

3.2.1 Generalidades

El tratamiento de las aguas residuales de la Compañía Cervecera de Nicaragua consiste en el sistema de depuración denominado Skjöldgas-Biowin-Biolak, el cual es una combinación de dos procesos biológicos que emplean microorganismos para degradar la materia orgánica presente en el agua residual por medio de un reactor que trabaja en condiciones anaeróbicas y un sistema de lodos activados que trabaja en condiciones aeróbicas.

El sistema denominado Skjöldgas está constituido por una criba rotatoria, una pila de preacidificación, un reactor anaerobio y un clarificador. El sistema denominada Biolak está conformada por un sistema de lodos activados, un clarificador, un aireador y un biofiltro, todos ellos contenidos dentro de una misma pila. En el Anexo D se presentan una serie de fotografías de la planta de tratamiento.

3.2.2 Pretratamiento

El pretratamiento consiste fundamentalmente de dos etapas. La primera etapa está compuesta por una trampa de grasas y dos cámaras de forma rectangular ubicadas en serie, en las cuales sedimentan todas las partículas cuyo peso específico es mayor que el del agua.

La segunda etapa del pretratamiento consiste en la separación de sólidos por medio de una Criba Rotatoria (Ver Anexo D, fotografía 1), la cual es capaz de remover sólidos con tamaños de partículas superiores a 1mm como cascarillas, fibras, granos, latas y tapas de botella. La criba rotatoria es la primera etapa del sistema denominado Skjöldgas.

3.2.3 Tratamiento Primario

El tratamiento primario se realiza por medio de una preacidificación, la cual permite ajustar el pH del efluente a valores requeridos para asegurar la degradación del grupo de bacterias metanogénicas dentro del digestor anaeróbico. La preacidificación se lleva a cabo en una pila cuyo volumen es de 346 m³ (Ver Anexo D, fotografía 2), en esta pila se agrega ácido clorhídrico al agua y se agita hasta homogeneizar por medio de un agitador sumergido que mantiene el agua en circulación. El periodo de retención en esta etapa oscila entre 3-4 horas. Al terminar esta etapa, dos bombas sumergidas conducen el agua al tratamiento secundario. Otra función importante de esta pila es la de regular el flujo a la entrada del reactor.

3.2.4 Tratamiento Secundario

El tratamiento secundario está compuesto por un procesos anaeróbico que se lleva a cabo en un reactor, seguido por un proceso aeróbico que se lleva a cabo en una pila de lodos activados.

a) Reactor Anaerobio

El reactor anaeróbico constituye una unidad, dentro de la cual se presentan dos etapas conocidas como: carga elevada (10-20 kg DQO/m³.día) y carga reducida (6-7 kg DQO/m³.día) (Ver Anexo D, fotografías 3 y 4). El agua residual proveniente del tanque de preacidificación es distribuida en el fondo de la carga elevada por medio de dos bombas instaladas en el fondo de la estación de bombeo y mezclado con la cama de lodo anaeróbico por el sistema de distribución.

El proceso anaeróbico comienza neutralizando el agua ya sea con NaOH o HCl, según sea el caso, lo que permite que las bacterias metanogénicas produzcan biogás. Estos microorganismos transforman la materia orgánica en CO₂, CH₄ y material celular principalmente.

Para mantener estable el funcionamiento del reactor anaerobio la temperatura se mantiene entre los 30 y 35° C, el pH entre 7 y 7.4 y una relación de nutrientes DQO:N:P=500-700:5:1.

Subproducto del reactor anaerobio

La medida del caudal y la composición del biogas generado durante la descomposición anaerobio de la materia orgánica, es un excelente indicador de la eficacia del reactor anaerobio. Una variación en estos parámetros puede indicar problemas operacionales. El gas se compone principalmente de CH₄ y CO₂, aunque se pueden presentar en menores concentraciones otros tipos de gases como H₂S.

El biogas generado en el reactor es recolectado en una cubierta de gas construida con una capa especial de PVC flexible, fijada alrededor de las paredes del reactor anaeróbico. La capa esta equipada con bolsas pesadas las cuales están llenas de agua, esto permite que cuando la capa no contenga gas pueda flotar en la superficie del líquido.

Cuando la presión es mayor de 20 mmca., el biogas es liberado automáticamente y es enviado a las calderas de la industria o es quemado en una chimenea (Ver Anexo D, fotografía 5). La cantidad de biogas generada depende directamente de la carga y las condiciones del reactor. El diseño esta basado en un flujo promedio de 1,060 m³/día, con una concentración de metano del 65%.

b) Separador Lamello

Al final de la etapa anaerobia está localizada una zona de clarificación denominada separador lamello (Ver Anexo D, fotografía 6). En esta etapa, el lodo se deposita en el

fondo y el agua fluye hacia la siguiente etapa. Los lodos almacenados son retornados con cierta frecuencia (10 a 20 minutos) para mantener estable la biomasa dentro de la carga reducida del reactor.

c) Pila de Lodos Activados

El tratamiento secundario continúa por medio de un proceso aerobio denominado Lodos Activados (Ver Anexo D, fotografía 7), el cual constituye la primera etapa del sistema Biolak. La pila de lodos activados tiene un volumen de 3,080 m³ en la cual existe una gran cantidad de especies, sobre todo bacterias y microorganismos altamente desarrollados. Ellos se asientan hasta cierto punto y desarrollan los llamados flocs de lodo activado.

Los flocs de lodos activados son ingeridos por los microorganismos. Esta integración de partículas de tierra en su metabolismo constituye los procesos de reducción y limpieza. La planta de lodos activados es considerada de baja carga y su principio tiene muchas ventajas, como una alta reducción de materia orgánica, lento crecimiento de lodo, alta capacidad de homogenización biológica y operación estable.

En este proceso al igual que en el reactor anaeróbico es necesario mantener una relación entre los nutrientes de DBO:N:P igual a 100:5:1, para garantizar la estabilidad de la biomasa. El contenido de oxígeno disuelto debe mantenerse en el rango de 0.2-1.0 mg/L. En la pila de lodos activados existen cadenas de aireación cuya función es proveer oxígeno y mantener en movimiento el volumen total de la pila y la biomasa en suspensión.

d) Clarificador

Al final de la pila de lodos activados se localiza un clarificador (Ver Anexo D, fotografía 8). En esta zona los flocs se sedimentan y son separados de la capa sobrenadante. Los lodos son retirados mediante un succionador flotante, la mayor parte es transferida al inicio de la pila de lodos activados. Debido a que la cantidad de lodo aumenta continuamente, una pequeña parte de este, denominado lodo sobrante es extraído y transferido a través de una bomba a una compactadora de lodos.

e) Pila de Aireación

Luego de la clarificación, al agua se le inyecta oxígeno por medio de cadenas aireadas en una pila de aireación (Ver Anexo D, fotografía 9). La cadena aireadora esta compuesta por unidades flotantes conectadas entre si por tubos de entrada de aire. Están ubicadas en el fondo de la pila de aireación. El aire es bombeado verticalmente hacia las unidades aireadoras y fluye en forma de pequeñas burbujas en el agua.

3.2.5 Tratamiento Terciario

a) Biofiltros

El biofiltro es la última etapa del sistema Biolak, consiste en una pila con un volumen de 80 m³, provista de plantas acuáticas llamada "Totoras" (typhalafioidea), cuyo objetivo principal es la remoción de nutrientes. El agua clarificada pasa por rebose de la pila de aireación hacia el biofiltro (Ver Anexo D, fotografía 10).

b) Granja de Peces

La Compañía Cervecería de Nicaragua ha implementado una granja de peces como última etapa del tratamiento de sus efluentes, esta granja recibe los efluentes del biofiltro y los peces utilizados en ella son las popularmente llamadas "tilapias" (Ver Anexo D, fotografía 11). El objetivo de esta granja, más que la cosecha de tilapias, es la remoción total de la materia orgánica residual en el agua que sale del biofiltro.

Luego de la granja de peces, el agua es conducida hacia su receptor final, el Lago Xolotlán (Ver Anexo D, fotografía 12).

3.2.6 Lodos Residuales

En la planta de tratamiento se recolecta en promedio 3m³/día de lodos residuales de la pila de lodos activados. Estos lodos son compactados y recolectados en un contenedor para luego ser distribuidos como abono en las áreas verdes de la CCN (Ver Anexo D, fotografías 13 y 14).

3.3 ORIGEN Y NATURALEZA DE LOS VERTIDOS DE UNA CERVECERIA

Para predecir las características de los lodos generados en una planta depuradora de aguas residuales proveniente de una industria es importante conocer la naturaleza del agua residual de la misma. Los elementos contaminantes en un vertido de cerveza son principalmente de naturaleza orgánica, resultado de pérdidas en el proceso de fabricación que van a parar al sistema de drenaje.

Durante la elaboración del mosto se vierten aguas de lavado de la malta, en su molturación, así como aguas de aclarado de tanques de almacenamiento, que contienen materias primas y aditivos, además se vierte turbio caliente en las paradas de limpieza (Arrieta, 1998).

Durante la siembra, fermentación y maduración, se vierte cerveza al final de las operaciones de transferencia desde cocimiento a fermentación y desde ésta a maduración. También se vierte la levadura depositada en los fondos de los tanques de maduración. En la filtración y estandarización se vierte cerveza y levadura. El principio y fin de cada filtración se vierten normalmente al drenaje.

En las operaciones de envasado se vierte cerveza por rebose durante las operaciones de llenado de botellas y por roturas de botellas en el embalaje. También se vierte papel, adhesivos, tintas, agentes de limpieza alcalinos (sosa) y ácidos (fosfórico), detergentes y desinfectantes. La cerveza envasada que no cumple con las normas de calidad también se vierte por el drenaje. Por último también llegan a parar al drenaje aceites minerales, restos de combustibles y las aguas sanitarias de la compañía.

Por lo tanto, la fase líquida del efluente de una cervecería contiene en general materia orgánica, en su mayor parte hidratos de carbono (almidón, azúcares y celulosa), proteínas y alcohol, constituyentes de los restos de cerveza y turbio (proteínas que precipitan durante cocción del mosto) y levadura, así como sosa de las operaciones de limpieza. La fracción sólida contiene celulosa del bagazo, complejos carbohidrato-proteína de la levadura y proteínas del turbio. Todos estos constituyentes: cerveza, turbio y, levadura, son formas concentradas de compuestos orgánicos y por lo tanto fuentes de elevada demanda de oxígeno, con la levadura en primer lugar.

Los efluentes líquidos de la Compañía Cervecera de Nicaragua reportan una DQO de 1,551.8 mg/L y una DBO₅ de 1,087.6 mg/L (D'León, 2003).

3.4 TRATAMIENTO DE LODOS

El lodo proveniente de la sedimentación y de los procesos de tratamiento biológico debe estabilizarse o tratarse antes de disponer de él o de reutilizarlo. La necesidad de la estabilización o del tratamiento depende del tipo de disposición o de reutilización y de las molestias potenciales debidas a los olores en el lugar (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Los procedimientos para tratar los lodos varían según la fuente y el tipo de aguas residuales de las que se derivan, del proceso utilizado para tratar las aguas residuales y del método último de disposición a la que se destinan los lodos. Los lodos que no han sido estabilizados, química, térmicamente o por digestión, se conocen como lodos crudos.

3.4.1 Estabilización

La estabilización de los lodos se lleva a cabo con el objetivo de reducir la presencia de patógenos, eliminar olores desagradables, inhibir, reducir o eliminar, su potencial de putrefacción. Los medios de estabilización disponibles para eliminar el desarrollo de estas condiciones desagradables son: reducción biológica del contenido de materia volátil, oxidación química de la materia volátil, adición de agentes químicos para hacer el lodo inadecuado para la supervivencia de los microorganismos y aplicación de calor con el objetivo de desinfectar o esterilizar el lodo (Metcalf y Eddy, 1995).

Las tecnologías disponibles para la estabilización del fango incluyen: (1) estabilización con cal, (2) tratamiento térmico, (3) digestión anaerobia, (4) digestión aerobia, y (5) compostaje.

- **Estabilización con cal**

La adición de cal para estabilización de lodos es un proceso sencillo que permite eliminar olores y patógenos mediante la creación de un pH igual a 12 durante más de dos horas. Cuando se agrega cal, los microorganismos que producen los gases, olores de la descomposición anaerobia son destruidos o inactivados, así como los patógenos. La agregación de cal también mejora las características de secado y sedimentación del lodo, pero reduce el poder fertilizante del lodo estabilizado en comparación con el lodo digerido anaerobiamente y aumenta su alcalinidad (Romero, 2002).

Para la estabilización del lodo con cal, se emplean dos métodos: (1) adición de cal al lodo antes del proceso de deshidratación, práctica conocida con el nombre de pretratamiento con cal, y (2) adición de cal al fango después del proceso de deshidratación, o post-tratamiento con cal (Metcalf y Eddy, 1995).

Para la estabilización se puede emplear tanto cal hidratada, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, como cal viva, CaO . La dosis de cal necesaria varía en función del tipo de lodo y de la concentración de sólidos, en la Figura 3.1 se indican las dosis típicas (Metcalf y Eddy, 1995).

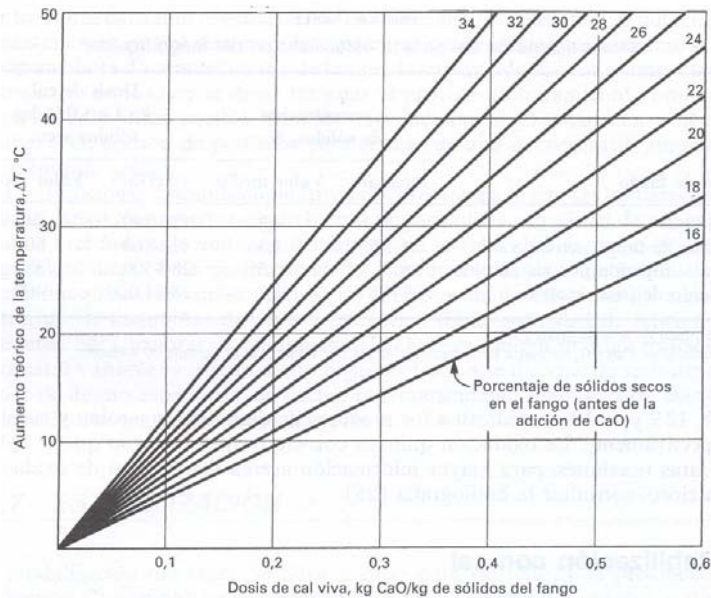


Figura 3.1.- Dosis típica de cal para la estabilización de lodos

- **Tratamiento Térmico**

El tratamiento térmico es un proceso continuo en el que el lodo se calienta en un depósito a temperaturas de hasta 260 °C y a presiones de hasta 2.76 kN/m², durante un corto espacio de tiempo (aproximadamente 30 minutos). El tratamiento térmico sirve, básicamente, como proceso de estabilización y de acondicionamiento, aunque en la mayoría de los casos, está considerado como un proceso de acondicionamiento (Metcalf y Eddy, 1995).

- **Digestión Anaeróbica**

En la digestión anaeróbica, la materia orgánica se descompone por la acción de los microorganismos en la ausencia del oxígeno, y se producen metano y anhídrico carbónico. En la digestión de lodos, aproximadamente del 30 al 35% de los sólidos de los lodos son descompuestos, y para cada kilogramo de materia orgánica destruida, se produce cerca de 1m³ de metano (Winkler, 1998). Los lodos digeridos anaeróbicamente son negros con un tenue olor a alquitrán, que se considera en general como inofensivo, y es suficientemente estable para poder ser utilizado como fertilizante. Durante la digestión anaeróbica, gran parte del contenido de nitrógeno y de fósforo se libera en forma soluble, de manera que el valor fertilizante está sobre todo en la fase líquida.

Por lo general, los digestores anaeróbicos no se asocian con los sistemas simples de aguas residuales debido a su complejidad. Estos deben mezclarse y calentarse, y es preciso aumentar el pH del lodo. Además, hay que recuperar el gas para usarlo o quemarlo al aire libre. Por estas razones la digestión anaeróbica se confina, de ordinario, a plantas de tratamiento convencionales grandes (Crites y Tchobanoglous, 2000).

- **Digestión Aeróbica**

En general, la digestión aeróbica se usa para estabilizar lodos activados de las plantas de tratamiento compactas y aerobias o de las plantas pequeñas de lodos activados. En las plantas pequeñas se usa con mayor frecuencia la digestión aerobia en vez de la digestión anaerobia porque: (1) la operación es relativamente fácil, (2) los costos son menores, (3) genera un producto estable, sin olor y similar al humus y (4) en el licor sobrenadante se produce una menor concentración de DBO (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Por lo general, la digestión aeróbica se lleva a cabo en tanques de concreto abiertos y no calentados. Los factores que deben tomarse en el diseño son la temperatura, el tiempo de retención hidráulico, la carga de sólidos, las necesidades de oxígeno, el requerimiento de aire y la necesidad de energía para la mezcla (Crites y Tchobanoglous, 2000).

- **Compostaje**

El compostaje es un proceso en el que la materia orgánica sufre una degradación biológica hasta alcanzar un producto final estable. El lodo compostado adecuadamente es un material tipo humus, higiénico y libre de características desagradables. Aproximadamente el 20 o 30% de los sólidos volátiles se convierten en dióxido de carbono y agua. Conforme se produce la descomposición de la materia orgánica contenida en el lodo, el compost se calienta hasta alcanzar temperaturas situadas en el intervalo de pasteurización (50 a 70°C), lo cual permite la destrucción de organismos patógenos entéricos (Metcalf y Eddy, 1995).

El proceso puede llevarse a cabo por vía aerobia o anaerobia. El compostaje aerobio acelera el proceso de descomposición del material orgánico y permite obtener altas temperaturas, necesarias para la destrucción de patógenos, mientras que el anaerobio va siempre acompañado de malos olores que no se presentan en el primero, razón por la cual es poco común hacer compostaje anaerobio (Romero, 2002).

El proceso de compostaje implica una compleja destrucción de la materia orgánica junto con la producción de ácido húmico para dar lugar a un producto final estable. La mayoría de las operaciones de compostaje consisten en las siguientes etapas fundamentales: (1) mezcla del fango deshidratado con un material de enmienda o soporte; (2) aireación de la pila de compostaje bien por adición de aire, por volteo mecánico, o mediante ambos sistemas; (3) recuperación del material soporte (caso de que sea posible); (4) maduración adicional y almacenamiento, y (5) evacuación final (Metcalf y Eddy, 1995).

El material de enmienda es un material orgánico que se añade al sustrato a compostar con la finalidad de obtener un producto de menor peso y aumentar el volumen de huecos para favorecer la aireación. Los materiales de enmienda de uso más frecuente son aserrín, paja, compost reciclado y cáscara de arroz (Metcalf y Eddy, 1995).

El material de soporte es un material orgánico o inorgánico que se emplea para proporcionar soporte estructural y para aumentar la porosidad de la mezcla con el objetivo de mejorar la efectividad de la aireación. El material más empleado son astillas de madera (Metcalf y Eddy, 1995).

3.4.2 Acondicionamiento

El acondicionamiento de lodos es necesario para obtener un lodo espesado o desaguado de buena concentración de sólidos, cuando se usan procesos mecánicos de espesado o secado (Romero, 2002). El lodo se acondiciona expresamente para mejorar sus características de deshidratación los dos métodos más comunes empleados implican la adición de reactivos químicos y el tratamiento térmico (Metcalf y Eddy, 1995).

- **Acondicionamiento Químico**

El uso de productos químicos para el acondicionamiento del lodo para su deshidratación es una práctica económica debido al aumento de la producción y a la mayor flexibilidad que se obtiene. El acondicionamiento químico permite reducir la humedad del fango, desde el 90-99 % hasta el 65-85 %, dependiendo de la naturaleza de los sólidos a tratar. El acondicionamiento químico da lugar a la coagulación de los sólidos y a la liberación del agua absorbida. Los productos químicos que se emplean incluyen el cloruro férrico, la cal, la alúmina (Al_2O_3) y polímeros orgánicos (Metcalf y Eddy, 1995).

- **Acondicionamiento Térmico**

El calentamiento de los lodos bajo presión, llamado acondicionamiento térmico, mejora las características de asentamiento al causar la descomposición de las células de la biomasa, y se efectúa manteniéndolos, por ejemplo, por 20 a 30 minutos de 180 a 200 °C, y a una presión de 10 a 20 atmósferas. Los procesos de tratamiento térmico tienen la ventaja de esterilizar los lodos, destruyendo los organismos causantes de enfermedades, (Winkler, 1998).

3.4.3 Deshidratación

La deshidratación es una operación unitaria física utilizada para reducir el contenido de humedad de los lodos por algunas o varias de las siguientes razones (Metcalf y Eddy, 1995):

- a) Los costos de transporte del lodo hasta el lugar de evacuación final son menores cuando se reduce el volumen por deshidratación.
- b) El lodo deshidratado es más fácil de manipular que el lodo líquido o espesado.
- c) La deshidratación es necesaria antes de la incineración del lodo para aumentar su poder calorífico por eliminación del exceso de humedad.
- d) La deshidratación es necesaria antes del compostaje para reducir la cantidad de material de enmienda o soporte.
- e) Con la eliminación del exceso de humedad se puede evitar la generación de olores y la putrescibilidad del lodo.
- f) La deshidratación del lodo suele ser necesaria antes de su evacuación a vertederos controlados para reducir la producción de lixiviados en la zona de vertederos.

Los dispositivos de deshidratación utilizan varias técnicas para la eliminación de la humedad, algunas se basan en la evaporación y percolación naturales, mientras que los aparatos de deshidratación mecánica utilizan medios físicos, asistidos mecánicamente, para acelerar el proceso. Los medios físicos utilizados incluyen la filtración, el prensado, la acción capilar, la extracción por vacío y la separación y compactación por centrifugación (Metcalf y Eddy, 1995).

La selección del sistema de deshidratación es función del tipo de fango a deshidratar y del espacio disponible. Para plantas pequeñas, en las que la disponibilidad del terreno no es problema, las eras de secado o las lagunas son los medios más comúnmente empleados.

3.4.4 Incineración

Permite el aprovechamiento energético de los lodos, aunque este procedimiento presenta el inconveniente de requerir instalaciones que exigen una fuerte inversión económica y personal altamente especializado.

El poder calorífico del lodo depende exclusivamente de su contenido en materia orgánica, aceptándose un valor promedio de 23 MJ/kg para un 100% de materia orgánica en la base de 100% de residuo seco (Oakley, 1997).

La presencia de metales pesados durante la incineración de lodos pueden provocar especies volátiles en la zona de combustión, condensando sobre las partículas ceniza volante, e incluso algunos metales como As, Hg y Pb pueden volatilizar por efecto de la temperatura, lo que hace desaconsejables este procedimiento (Oakley, 1997).

La incineración no resuelve completamente el problema de disposición, porque será todavía necesario disponer de la ceniza residual, descargándola sobre el terreno o en el mar. La ceniza se puede también aprovechar en el acondicionamiento de lodos y como un auxiliar filtrante en la desecación (Winkler, 1998).

Las cenizas generadas en la incineración de lodos puede ser combinada con otros materiales para producir ladrillos, briquetas, pavimento de carreteras o como materia prima del cemento Pórtland (ver sección 3.6.2).

3.5 APLICACIÓN DE LOS LODOS DE AGUAS RESIDUALES

3.5.1 Aplicación de los lodos como abonos orgánicos y mejoradores de suelos

La aplicación de lodos al suelo con fines agrícolas es benéfico desde varios puntos de vista dentro de los que se incluyen (Crites y Tchobanoglous, 2000):

- a) La materia orgánica mejora la estructura del suelo, la tierra cultivable, la capacidad de retención del agua, la infiltración del agua y la aireación del suelo.
- b) Los macronutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio) y micronutrientes (hierro, manganeso, cobre, cromo, selenio y zinc) presentes en los lodos, ayudan en el crecimiento vegetal.

3.5.1.1 Características principales del lodo para su aplicación como abono

Las propiedades importantes de los lodos que necesitan ser caracterizadas, con el objetivo de valorar su adecuada aplicación como abonos orgánicos y mejoradores de suelos, incluyen: contenido de sólidos totales, contenido de sólidos volátiles, pH, contenido de materia orgánica, contenido de patógenos, contenido de nutrientes, contenido de metales, contenido de químicos orgánicos, contaminantes peligrosos (EPA, 1995).

- **Contenido de sólidos totales**

El contenido de sólidos totales en los lodos incluye los sólidos suspendidos y disueltos. El contenido de sólidos totales puede afectar el tipo de transporte y forma de aplicación de los lodos al suelo y el almacenamiento de los mismos (EPA, 1995).

- **Contenido de sólidos volátiles**

El contenido de sólidos volátiles en los lodos provee una estimación del contenido orgánico del material. La determinación del porcentaje de sólidos volátiles en los lodos es importante para determinar posibles problemas de olores en el lugar de aplicación (EPA, 1995).

La reducción de sólidos volátiles es una opción para la reducción de atracción de vectores. De acuerdo a los “Estándares para el Uso y Disposición de Lodos de Aguas Residuales” de la EPA, la atracción de vectores se reduce si la masa de sólidos volátiles en los lodos es reducida por lo menos hasta un 38% durante su tratamiento.

Generalmente los lodos no estabilizados contienen de 75 a 85% de sólidos volátiles en base de peso seco. La digestión anaerobia, digestión aerobia, estabilización alcalina y el compostaje, pueden ser utilizados para la reducción del contenido de sólidos volátiles en los lodos y de esta manera reducir la generación de olores en los sitios de aplicación.

- **pH**

El pH de los lodos es un parámetro importante a evaluar antes de la aplicación al suelo debido a que un pH no adecuado de los lodos puede alterar el pH del suelo afectando las cosechas e influenciando la absorción de metales por el suelo y las plantas. No se debe aplicar lodos en suelos de uso agrícola, forestales o jardines, cuyo pH sea inferior o igual a 5.

Un ajuste de pH en los lodos, proporciona además un control del nivel de patógenos y del potencial de atracción de vectores. Los lodos con un bajo pH (menor que 6.5) promueven la lixiviación de metales pesados a través del suelo, mientras que los altos pH (mayor que 11) en los lodos elimina muchas bacterias y, en combinación con el suelo neutros o de altos pH, puede inhibir la absorción de metales pesados a través del suelo (EPA, 1995).

- **Patógenos**

Los microorganismos causantes de enfermedades se conocen como patógenos, estos incluyen bacteria, virus, protozoos y huevos de gusanos parásitos, a menudo están presentes en aguas residuales municipales así como en los lodos crudos. Los patógenos representan un peligro para la salud pública si se transfieren a los cultivos alimenticios producidos en tierras a las cuales se aplicó lodos contaminados, o son transportado lejos del sitio por vectores tales como insectos, roedores, y pájaros (EPA, 1995).

La Agenda de Protección Ambiental (EPA) establece dos categorías de lodos de acuerdo a su contenido de patógenos: lodos clase A y lodos clase B. Los lodos clase A son aquellos lodos que son tratados para reducir la presencia de patógenos debajo de los niveles detectables y pueden ser aplicados al terreno sin restricciones relacionadas a patógenos.

Los lodos clase B son aquellos que luego de ser tratados para reducir la presencia de patógenos aún contienen niveles perceptibles de ellos. Cuando se aplican este tipo de lodos al suelo se debe reducir la exposición humana y animal hasta que factores ambientales como el calor, la luz solar y la deshidratación reduzcan la presencia de patógenos.

En la Tabla B.3 del Anexo B se muestran los límites máximos permitidos de patógenos en los lodos de aguas residuales que se aplican al suelo, de acuerdo a los “Estándares para el uso y disposición de lodos de aguas residuales” de la EPA.

- **Nutrientes**

Los nutrientes presentes en los lodos de aguas residuales, tales como nitrógeno, fósforo y potasio, entre otros, son esenciales para el crecimiento de las plantas y da a los lodos sus propiedades como fertilizante. Los niveles de nutrientes son la clave para determinar el rango de aplicación al suelo de los lodos de aguas residuales.

Un excesivo nivel de nutrientes debido a una alta tasa de aplicación de nutrientes puede provocar la contaminación de aguas subterráneas y aguas superficiales (EPA, 1995).

➤ **Nitrógeno**

El nitrógeno puede presentarse en los lodos de aguas residuales en forma inorgánica, en forma de amonio (NH_4^+) o nitrato (NO_3^-), o en forma orgánica. La forma en la cual el nitrógeno se presenta en los lodos es un factor clave para determinar cuanto nitrógeno está disponibles para la planta, así como el potencial de contaminación de las aguas subterráneas. Generalmente, el NO_3^- es la forma inorgánica del nitrógeno más soluble en agua, y por lo tanto es la que presenta un mayor peligro de contaminación del agua subterránea debido a su alta movilidad en la mayoría de los tipos de suelo.

El nitrógeno orgánico se debe descomponer por los microorganismos del suelo, o mineralizarse a NH_4^+ y NO_3^- , para que pueda ser asimilado por las plantas. Por lo tanto, el nitrógeno orgánico se puede considerar una forma de lenta de liberación de N. Cuando el nitrógeno se presenta en los lodos en su forma inorgánica NH_4^+ resulta más viable inyectar los lodos al suelo para evitar la volatilización del NH_4^+ en amoníaco (NH_3).

La cantidad de nitrógeno orgánico en los lodos está asociada con el contenido de sólidos. Por lo tanto los niveles de nitrógeno orgánico no son apreciablemente alterados por la deshidratación o el secado de los lodos. En cambio, las formas de nitrógeno solubles en el agua se pierden durante la deshidratación de los lodos.

El contenido de N orgánico en los lodos puede estar entre 1 al 10 % en base del peso seco. Los compuestos orgánicos de N encontrados en los lodos son sobre todo aminoácidos, indicando la presencia de materiales proteicos.

Los “Estándares para el Uso y Disposición de Lodos de Aguas Residuales” de la EPA, disponen que los lodos sean aplicados al suelo de acuerdo a la tarifa agronómica para el nitrógeno, respetando siempre los límites de aplicación de cargas de contaminantes. La tarifa agrónoma para el nitrógeno es la tarifa que se utiliza para proporcionar la cantidad de nitrógeno requerida por las plantas en función de la cantidad de nitrógeno disponible en el suelo. Las tasas de carga del nitrógeno se determinan para que se ajusten al nitrógeno disponible. La cantidad anual de nitrógeno disponible aportado por la aplicación de lodos se puede estimar utilizando la siguiente ecuación:

$$L_N = [(NO_3) + k_v(NH_4) + f_n(N_o)]F \quad \text{Ec. 3.1}$$

donde :

L_N	=	Disponibilidad de nitrógeno para las plantas en el año de la aplicación, lbN/ton(kgN/tonne).
NO_3	=	Porcentaje de nitrógeno en forma de nitrato en el lodo.
k_v	=	Factor de volatilización para la pérdida de amoníaco. = 0.5 para el lodo líquido aplicado superficialmente = 0.75 para el lodo deshidratado aplicado superficialmente = 1.0 para el lodo inyectado deshidratado o líquido
NH_4	=	Porcentaje de nitrógeno amoniacal en el lodo
f_n	=	Factor de mineralización para el nitrógeno orgánico

		= 0.5 para climas cálidos y lodo digerido
		= 0.4 para climas fríos y lodo digerido
		= 0.3 para climas fríos o compost de lodo
N _o	=	Porcentaje de nitrógeno orgánico en el lodo
F	=	Factor de conversión, 2000 lb/ton de sólidos secos

➤ **Fósforo, Potasio y otros nutrientes en los lodos**

Los lodos contienen varias concentraciones de macro y micronutrientes requeridos para el crecimiento de las plantas. Algunos componentes de los lodos, tales como el fósforo, el calcio, el magnesio y el hierro forman fácilmente compuestos insolubles con los sólidos de los lodos y permanecen en concentraciones relativamente altas en los lodos. Otros componentes de los lodos, tales como el potasio (K) y el sodio (Na), son solubles en agua y se descargan con las aguas residuales tratadas, a menos que se utilicen procesos avanzados especialmente para removerlos del agua, así que su concentración en los lodos es relativamente baja.

Si los lodos son deshidratados, la concentración de los compuestos que permanecen en los lodos disminuirá, mientras que el secado al aire o por calor dará lugar a niveles crecientes debido a que estos componentes son no volátiles.

• **Metales**

Los lodos pueden contener metales que podrían acumularse en el suelo al ser aplicados a éste, creando posibles riesgos tóxicos para las plantas, animales y el hombre.

Los metales pesados, en altas concentraciones, son todos tóxicos, aunque algunos de ellos, como el cobre, zinc y molibdeno, son esenciales a los organismos vivos. El mercurio, cadmio y plomo son, en general, tóxicos y reciben gran atención por ser elementos que se magnifican biológicamente, en el medio natural, a través de la cadena alimenticia (Romero, 2002).

Las concentraciones de metales en los lodos en gran parte dependen del tipo y de la cantidad de basura industrial descargados en el sistema de tratamiento de aguas residuales. Debido a que los metales son generalmente insolubles, están generalmente presentes en niveles más altos en lodo que en las aguas residuales.

En la Tabla B.4 del Anexo B se muestran las concentraciones límites de metales en los lodos y en el suelo, de acuerdo con los “Estándares para el Uso y Disposición de Lodos de Aguas Residuales” de la EPA.

• **Materia orgánica**

El relativamente alto nivel de materia orgánica en los lodos permite que éstos sean usados como acondicionadores de suelos mejorando las propiedades físicas de éste, como el incremento de la filtración de agua y la capacidad de retención del agua (EPA, 1995).

La materia orgánica de los lodos también contribuye a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo, permitiéndole retener el potasio, el calcio y el magnesio. La presencia de la materia orgánica mejora la diversidad biológica del suelo y hace que los nutrientes estén más disponibles para las plantas (Crites y Tchobanoglous, 2000).

- **Productos químicos orgánicos**

Los plaguicidas, los disolventes industriales, los colorantes, los plastificantes, los agentes tensioactivos y muchas moléculas orgánicas complejas, generalmente con poca solubilidad en agua y elevada capacidad de adsorción, tienden a acumularse en los lodos.

3.5.1.2 Selección del lugar de aplicación de lodos

Las características de importancia del lugar de aplicación de lodos son la topografía, el drenaje, el tipo de suelo y la profundidad, la permeabilidad del suelo y su química, la profundidad de las aguas subterráneas, la proximidad a áreas crítica (que necesiten áreas de amortiguación o zonas de mitigación de impacto) y que sean de fácil acceso para el reparto de los lodos (Crites y Tchobanoglous, 2000).

- **Topografía**

La topografía apropiada del lugar depende del tipo de lodo y del método de aplicación. El lodo líquido se puede regar, rociar o inyectar en terrenos ondulados con pendiente de hasta 15%. Los lugares boscosos pueden tener pendiente de hasta 15%, y de hasta 30% siempre y cuando cumpla con colocar áreas de amortiguación frente a los riachuelos. El lodo deshidratado se riega en tierras agrícolas con ayuda de un tractor y un aplacador o esparcidor. En agricultura se han usado pendientes de hasta 15%, y de hasta 30% en silvicultura. Es importante observar y documentar la presencia de cualquier drenaje en el lugar (Crites y Tchobanoglous, 2000).

- **Características del suelo**

Dentro de las características deseables del suelo se incluyen: (1) suelo limoso, (2) permeabilidad lenta a moderada, (3) profundidad del suelo de 2 pies (0.6 m) o más, (4) pH del suelo de neutral a alcalino y (5) suelo bien drenado a moderadamente drenado. Prácticamente cualquier suelo se puede adaptar a un sistema bien diseñado y bien manejado (Crites y Tchobanoglous, 2000).

- **Profundidad hasta el agua subterránea**

Para los emplazamientos de aplicación en suelo se prefiere que el nivel freático esté, al menos, a una profundidad de 3 pies (1 m). Se toleran fluctuaciones estacionales del nivel freático de 1.5 pies (0.5 m). Si las aguas subterráneas poco profundas no se utilizan como agua potables, entonces la profundidad de las mismas puede ser de 1.5 pies antes de que surjan problemas de movilidad de los suelos (Crites y Tchobanoglous, 2000).

- **Áreas de amortiguación**

Con frecuencia, las zonas de aplicación se reducen por las áreas de amortiguación o zonas de impacto, que separan las zonas de aplicación de las zonas sensibles tales como residencias, pozos, caminos, aguas superficiales y límites de propiedad. En la Tabla 5.3 se muestran algunas distancias usuales de áreas de amortiguación (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Tabla 3.2.- Distancias a las áreas de aplicación en el suelo, según los emplazamientos

Emplazamiento	Distancia, m
Residencias	60-90
Límites de propiedad	15-60
Caminos	15-30
Llanuras de inundación	15-30
Riachuelos	15-60
Pozos privados	30-60
Pozos de suministro público	150-600

3.5.2 Aplicación de los lodos como materiales de construcción

Japón es probablemente el primer país en confrontar la dificultad del manejo de lodos, por ende es el país más avanzado en la industria de reuso de lodos. Japón ha logrado desarrollar distintos procesos de solidificación térmica de lodos. El producto final de estos procesos son: conglomerados ligeros, ladrillos, baldosas, carbón y escoria (Okuno, 2004).

Se ha comprobado que la calidad del producto final de estos procesos es mejor que la de los productos tradicionales, y que todos son técnicamente factible pero no económicamente. Sus precios de manufactura son siempre altos en comparación con los precios del mercado; además, consumen gran cantidad de energía. Sin embargo, si representan una opción de disposición de lodos, todos estos productos son considerablemente valiosos para una ciudad grande donde no hay lugar para evacuar los lodos.

Otra alternativa para la evacuación de lodos es la utilización de estos como materia prima del cemento Pórtland. La utilización de ya sea la torta deshidratada o la ceniza depende de las facilidades de transporte.

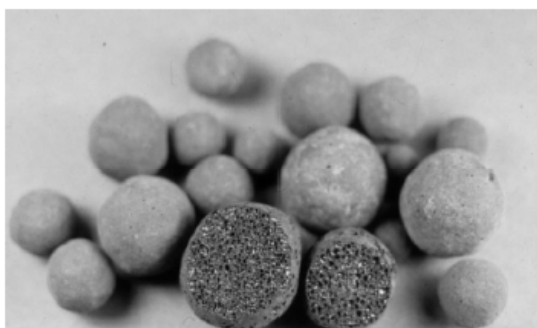
3.5.2.1 Procesos de solidificación térmica de los lodos

- **Conglomerados ligeros artificiales**

Para la elaboración de conglomerados ligeros, la ceniza producto de la incineración de los lodos es mezclada con agua y con una pequeña cantidad de los residuos de la destilación

del alcohol, el cual trabaja como un agente aglutinante. Luego la mezcla entra a un Pelitizador Centrífugo, en el cual se forman los llamados pellets (Ver Figura 3.2).

Los pellets son secados a 270°C (518 F) por un periodo de 7 a 10 minutos. Luego se transportan a un horno de estrato fluidificado donde se calientan a 1,050°C por unos pocos minutos. Después de finalizado el proceso de calentamiento, los pellets son refrigerados con aire. Luego de esto se forman películas duras en la superficie de los pellets mientras el interior es poroso. El producto final tiene una forma esférica y su gravedad específica es 1.4-1.5 (Okuno, 2004).



(a)



(b)

Figura 3.2.- (a) Conglomerados ligeros a partir de lodos, (b) Adoquines fabricados con conglomerados ligeros

Los conglomerados ligeros de lodos se ha utilizado para pavimentar carreteras, presentando una alta absorción del agua de lluvia, evitando así el encharcamiento de la misma.

- **Escoria**

La fabricación de escoria a partir de lodos es uno de los procesos de solidificación térmica más populares. Cuando la reducción de volumen e inactivación de metales pesado es el problema principal de la evacuación de lodos, el proceso de fabricación de escoria representa una solución. Cuando la torta de lodo es convertida a escoria, su volumen se reduce a solamente 4% del volumen original. Este proceso puede comenzar con la torta de lodos deshidratada. El contenido orgánico de la torta de lodos tiene valor calorífico, lo cual ayuda a que el calor aumente (Okuno, 2004).

Un secador por vapor seca indirectamente la torta de lodos a un contenido de humedad de 20%. Luego es pulverizado y secado aún más al mismo tiempo por una trituradora caliente. La torta de lodo es transformada a un polvo de 5% de humedad. Después de la adición de una pequeña cantidad de cal como reactivo auxiliar para derretir, el polvo de lodo pulverizado es inyectado dentro de un horno de ciclón precalentado a 1,500° C, esta temperatura es mantenida para quemar la materia orgánica en el polvo del lodo. Mientras la materia orgánica se quema, la materia inorgánica se funde, y fluye fuera del horno. Cuando se enfría, se obtiene la escoria (Ver Figura 3.3).

Si el material fundido se enfría rápidamente con agua fría, se obtiene una escoria granulada, que es una mezcla heterogénea de vidrio y cristal. La escoria secada al aire es usada como sustituto del conglomerado grueso natural, incluyendo conglomerado de concreto, material de relleno, material de soporte de carreteras, y otros materiales secundarios al concreto.

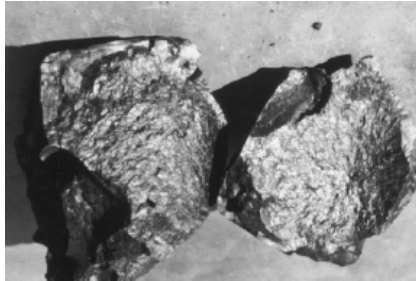


Figura 3.3.- Producto final del proceso de escoria

Si la escoria secada al aire es frágil, se somete a un tratamiento adicional de “templado”. Si se recalienta a 1,400°C por 30 minutos y luego gradualmente enfriado al aire, la escoria cristalizará. El producto final entonces se convierte en un mármol como mineral de estructura semi-cristalina. El producto es caracterizado por ser resistente y poseer alta resistencia ácida. Puede ser utilizado para hacer joyas e incluso piedras sepulcrales.

- **Ladrillos**

La ceniza de los lodos incinerados es la única materia prima necesaria para la fabricación de ladrillos, aunque también puede utilizarse el lodo seco combinado con arcilla. El proceso consiste en el moldeado a alta presión seguido por un calentamiento. La ceniza se vierte en un molde y es presionada por encima y abajo, hasta que alcanza una presión de 1.000 kg/cm² (Okuno, 2004)

La parte principal del proceso de calefacción consiste en un horno de chimenea de rodillo con mecheros de gas natural. La temperatura de este proceso afecta directamente la calidad del producto final. Los hornos de chimenea de rodillo es la mejor opción para un exacto control de la temperatura. Los transportadores del horno de rodillo llevan la ceniza moldeada desde la entrada a la salida del horno.

El rango de incremento de temperatura en el horno es de 600° C/h. Cuando alcanza 900°C, la temperatura del horno se mantiene constante por una hora para prevenir la formación de una base negra debido a las sustancias orgánicas que no están bien oxidadas. Luego, la temperatura es gradualmente incrementada alrededor de 1000° C y mantenida por un rato para calentar toda la porción de la ceniza moldeada.

Al proceso de calentamiento le sigue un ciclo de enfriamiento. Un rango lento de enfriamiento es importante para evitar la rotura por tensión térmica. El enfriamiento hasta la temperatura ambiente toma alrededor de 4 horas.

Los ladrillos fabricados a partir de la ceniza de lodos incinerados son superiores a los

ladrillos tradicionales en cuanto a su fuerza de compresión, su tasa de absorción del agua y su fuerza de torsión. Muchas calzadas públicas en Japón están pavimentadas con ladrillos de lodos (Ver Figura 3.4).



Figura 3.4.- Ladrillos a partir de lodos

- **Carbón**

Para la fabricación de carbón, la torta de lodo con un contenido de humedad del 80%, se alimenta a un secador de tambor. Luego el lodo seco se alimenta a un reactor de tambor de tipo horizontal donde se calienta a más de 700° C.

En el reactor, la parte orgánica de los lodos es térmicamente consumida bajo una atmósfera reducida. Como resultado se obtiene, gas inflamable y carbono. Mientras el gas es rehusado para calentar el secador, el producto final, carbón, es utilizado como suelo artificial de una planta, o como acondicionador de suelo o como sustituto del coagulante para un filtro de presión.

- **El lodo como materia prima del cemento Pórtland**

Los componentes químicos del cemento Pórtland son CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , y Fe_2O_3 . En general estos componentes son proporcionados por cal, arcilla, y hierro mineral. Estos compuestos están presentes en la torta de lodo, o en la ceniza del lodo incinerado (Okuno, 2001).

Una planta de cemento Pórtland puede utilizar como materia prima torta deshidratada de lodo o ceniza de lodo incinerado sin gran modificación del proceso existente. Cuando se utiliza la torta deshidratada, ésta es directamente inyectada dentro del horno para elaborar el clinker. Cuando es ceniza incinerada lo que se utiliza, ésta es mezclada con la materia prima tal como la arcilla y la cal, luego la mezcla entra al horno.

Aunque la torta del lodo contiene un alto contenido de humedad, el requerimiento de combustible para calentar el horno es mucho menor. La cantidad máxima permitida de la ceniza incinerada que se mezclará con la arcilla y la cal es de hasta el 2% del cemento Pórtland.

3.5.2.2 Características principales de los lodos y las cenizas de lodo incinerado para su aplicación como materiales de construcción

Una forma de evaluar la aptitud de aplicación de los lodos como materia prima para la elaboración de materiales de construcción, es la comparación de sus propiedades con las de los materiales arcillosos, los cuales son la materia prima convencional para la elaboración de una gran variedad de materiales de construcción.

Propiedades Principales de los Materiales Arcillosos

- **Composición química**

La composición química en gran medida caracteriza las propiedades de las arcillas. Los óxidos de mayor importancia para la composición química presentes en las arcillas son los siguientes:

- a) **Óxido de Silicio (SiO_2):** El contenido general de óxido de silicio o sílice en las arcilla varía entre 50-65 %, para las arcillas arenosas varía entre 80-85%.
- b) **Óxido de aluminio (Al_2O_3):** El óxido de aluminio o alúmina es el óxido refractario por excelencia, permite que los materiales o artículos elaborados a partir de arcillas con el adecuado contenido de alúmina sean resistentes a la acción de las altas temperaturas. Para la industria de las cerámicas para la construcción se utilizan arcillas básica (contenido de alúmina entre 28-38%) y semiácidas (contenido de alúmina entre 14-28%).
- c) **Óxidos de metales alcalinotérreos:** El óxido de Calcio (CaO) y el óxido de Magnesio (MgO) forman parte de la composición de minerales carbonatados. En cantidades considerables aumenta la porosidad de los productos cerámicos. El porcentaje presente del CaO en la composición química puede llegar hasta 20-25%, no así el MgO que apenas alcanza un 2-3%.
- d) **Óxidos de metales alcalinos:** Los álcalis Na_2O y K_2O procedente de las impurezas minerales que acompañan a los minerales formadores de arcilla y pueden proceder también de los feldespatos. Su composición porcentual alcanza 5-6%.
- e) **Otros óxidos:** En el mineral arcilloso, que contiene micas se puede encontrar óxido de titanio (TiO_2) y óxido de hierro III (Fe_2O_3).

Estudios como los de C. Huang, et al. (2001) y Abdul G. Liew, et al. (2004) han evaluado las características químicas de los lodos de aguas residuales comparándolas con las de la arcilla, sus resultados se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.3.- Composición promedio de óxidos en lodos de aguas residuales y arcillas

% Óxido	C. Huang, et al. (2001)		Abdul G. Liew, et al. (2004)	
	Lodo	Arcilla	Lodo	Arcilla
SiO ₂	43.42	61.95	29.26	59.98
TiO ₂	-	-	0.43	0.73
Al ₂ O ₃	10.48	16.95	8.46	21.85
Fe ₂ O ₃	5.51	9.27	2.78	4.51
MnO	-	-	0.05	0.03
MgO	-	-	0.31	0.27
CaO	0.05	0.45	1.62	0.03
K ₂ O	0.92	0.14	0.84	3.12
Na ₂ O	0.52	0.02	0.04	0.30
P ₂ O ₅	-	-	1.59	0.06

- **Plasticidad**

Los materiales arcillosos, amasados con cierta cantidad de agua, forman una pasta arcillosa que posee coherencia y plasticidad.

La plasticidad se puede definir como la propiedad de los materiales, en estado húmedo, de tomar bajo el efecto de una acción exterior la forma deseable sin que aparezcan interrupciones ni grietas, y conservar la forma adquirida durante el secado y la subsiguiente cocción.

La plasticidad se evalúa por el índice de plasticidad, el cual presenta la diferencia entre las humedades de la arcilla en el límite inferior de fluidez (límite líquido) y en el límite de plasticidad.

El índice de plasticidad se expresa de acuerdo a la ecuación 3.2:

$$IP = W_L - W_P \quad \text{Ec. 3.2}$$

donde W_F y W_P son las humedades correspondientes a los límites líquido y de plasticidad de un cordón de arcillas respectivamente. El índice de plasticidad determina el intervalo de humedades, en el cual la arcilla conserva el estado plástico. En dependencia del índice de plasticidad, los materiales arcillosos se clasifican según la Tabla 3.5.

Tabla 3.4.- Valores para evaluar el índice de plasticidad

Índice de plasticidad (%)	Tipo de plasticidad
$IP > 25$	Alta
$15 < IP < 25$	Media
$7 < IP < 15$	Moderada
$3 < IP < 3$	Baja
$IP < 3$	Nula

La industria de la cerámica para la construcción utiliza generalmente arcillas de plasticidad moderada. Las arcillas con un índice de plasticidad menor que 7 se moldean mal, mientras que las arcillas con un índice de plasticidad mayor que 15 se agrietan durante el secado.

Las arcillas con un alto índice de plasticidad necesitan la adición de aditivos desgrasantes, estos aditivos pueden ser de origen orgánico o inorgánico. Entre los aditivos inorgánicos se encuentran las arenas con granos de 0.5 a 2 mm y como aditivos orgánicos se emplean aserrín, paja o residuos agroindustriales.

- **Composición granulométrica**

La composición granulométrica tiene una influencia significativa en el resto de propiedades físicas tales como: plasticidad, contracción al secado, porosidad así como también en las propiedades mecánicas como la resistencia al desgaste, a la flexión, tracción y compresión. Las arcillas de alta plasticidad contienen un 80 o 90% de partículas menores de 0.005 m y no menos del 60% de partículas más menudas de 0.001 mm, mientras que en las arcillas de plasticidad moderada hay solo un 30 o 60% de partículas con un tamaño de hasta 0.005 mm (Alvarez, 2002).

- **Capacidad aglomerante**

La capacidad aglomerante se manifiesta en la posibilidad de cohesión de los granos de materiales no plásticos como arena, arcilla, aserrín, paja, al igual que en la formación después del secado de un artículo bruto con bastante resistencia mecánica.

- **Contracción al secado**

La contracción al secado consiste en que se reducen las dimensiones lineales y el volumen de la materia bruta. La contracción se expresa en por ciento del tamaño inicial del artículo. La contracción al secado transcurre en el proceso de evaporación del agua a partir de la materia bruta, como consecuencia de la disminución del espesor de las capas acuosas alrededor de las partículas de arcilla, aparición de los poros de la materia bruta y fuerzas de presión capilar, tendientes a acercar las partículas. Para diferentes arcillas la contracción lineal oscila entre 2-10% en función del contenido de las fracciones finas (Alvarez, 2002).

- **Humedad de Moldeo**

La humedad de moldeo es la cantidad de agua que debe contener la pasta arcillosa, cuando esta en su punto óptimo de moldeo, esto ocurre cuando la pasta arcillosa, ha alcanzado la consistencia adecuada y al tomarla con la mano ya no se adhiere.

- **Absorción de Agua**

La cantidad total de absorción de agua es una medida útil de la calidad de los productos elaborados con materiales arcillosos. La existencia de poros en estos artículos les confiere una marcada capilaridad, así el volumen total de vacíos (o de espacio de poro) en los productos elaborados con materiales arcillosos se puede estimar por la cantidad de agua que pueden absorber.

Entre menos agua un artículo absorba y conserve en su interior, mejor es su funcionamiento. Reducir la capacidad de absorción de agua de un producto elaborado con materiales arcillosos se considera una de las medidas para mejorar su calidad. Un artículo que absorbe fácilmente el agua puede ser vulnerable a la hinchazón y a las contracciones repetidas debido a las variaciones de la humedad y de la temperatura. La hinchazón y las contracciones repetidas probablemente conduzcan al debilitamiento del artículo (Alvarez, 2002).

- **Propiedades Mecánicas**

La magnitud de resistencia a la ruptura de la arcilla seca es una de las principales propiedades y adquiere un gran significado práctico en problemas relacionados con el procedimiento, moldeo y secado de los productos elaborados de materiales arcillosos.

La resistencia a la ruptura de la arcilla seca puede ser determinada utilizando los ensayos de resistencia a la compresión, o flexión. La resistencia a la compresión es quizás una de sus características más importantes para evaluar su calidad, de esta propiedad depende la durabilidad del artículo. En las pruebas de compresión se manifiesta la resistencia mecánica que presenta un material cuando se aplica cierta carga sobre él. Esta carga debe ser un esfuerzo normal concentrado.

Estudios como los de C. Huang, et al. (2001) evaluaron la variación de la resistencia a la compresión y porcentaje de absorción de agua en ladrillos elaborados a partir de lodos de aguas residuales combinados con arcillas en proporciones de 10 hasta 40%. En la Tabla 3.6 se muestra los niveles de calidad de los ladrillos de lodos de acuerdo a su porcentaje de absorción de agua y resistencia a la compresión.

Tabla 3.5.- Calidad de los ladrillos de lodo de acuerdo a la absorción de agua y su resistencia a la compresión

Calidad del ladrillo	Absorción de agua (% , max.)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
Primera clase	15	≥150
Segunda clase	19	150<X<75
Tercera clase	23	≤75

Fuente: C. Huang, et al., Reuse of water treatment plant sludge and dam sediment in brick-making IWA, Water Science and Technology Vol 44 No 10 pp 273–277, 2001.

IV. METODOLOGÍA

A continuación se describe las técnicas o procedimientos que se utilizaron durante esta investigación. Cada uno de los procedimientos fueron elegidos de manera que se cumpliera con los objetivos planteados.

4.1 Metodología utilizada para la caracterización de los lodos en estudio

4.1.1 Muestreo

Las muestras de lodo fueron tomadas directamente de la salida de la compactadora y se recolectaron en recipientes plásticos previamente esterilizados. Las muestras fueron preservadas mediante refrigeración a 4° C para conservar la integridad de todos sus constituyentes desde el momento en que se tomó la muestra hasta el momento de su análisis o determinación en el laboratorio, para lo cual no transcurrió más de 24 horas.

Se realizaron en total seis muestreos con el objetivo de garantizar la representatividad de las muestras, los eventos de muestreo se realizaron en el periodo comprendido entre los meses de Enero y Septiembre del año 2005.

4.1.2 Caracterización de los Lodos en Estudio

Con el objetivo de caracterizar los lodos en estudio, se realizaron una serie de análisis de laboratorio, estos análisis se mencionan en la Tabla 4.1. Los lodos fueron caracterizados física, química y biológicamente.

Los procedimientos de análisis y materiales utilizados durante la realización de cada uno de análisis se describen en el Anexo A.

Tabla 4.1.- Análisis de Laboratorio Realizados a los Lodos

Parámetro	Método Estandarizado
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
Sólidos totales, fijos y volátiles	2540G [†]
Contenido de humedad	2540G [†]
pH	9045C [†]
Plasticidad	T 90-87 [‡]
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	
Nitrógeno Kjeldahl	8075 [*]
Nitrógeno amoniacal	10031 [*]
Nitrato	8039 [*]
Fósforo Total	8190 [*]
Micronutrientes: K, Na, Mg, Fe, Ca	3110 - Absorción Atómica [†]
Metales Pesados	3110 - Absorción Atómica [†]
Contenido de óxidos: Al, Si, Ca, Fe	3110 - Absorción Atómica [†]
CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS	
Coliformes fecales	9221E y 9222D [†]
Bacteria Salmonella SP.	9260D [†]
Huevos de helminto	NOM-004-SEMARNAT-2002 ^{**}

[†] APHA (1992), Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales

[‡] AASHTO (1990), Standard Specification for Transportation Material and Methods of Sampling and Test

^{*} HACH (1999), Waterwater and Biosolids Analysis Manual

^{**} Norma Oficial Mexicana (2002), Lodos y Biosólidos – Especificaciones y Límites Máximos Permisibles de Contaminantes para su Aprovechamiento y Disposición Final.

4.2 Selección de las alternativas viables para el uso de lodos

4.2.1 Aplicación de los lodos como abono orgánico

Para determinar el potencial de aplicación de los lodos como abono orgánico se comparó su contenido de nutrientes y micronutrientes con datos recomendados en la literatura. Además, se evaluó si las características biológicas y químicas determinadas para los lodos en estudio cumplen con los valores recomendados en los “Estándares para el Uso y Disposición de Lodos de Aguas Residuales” de la EPA. Un resumen de los estándares de la EPA se presentan en el Anexo B.

Los resultados de estas comparaciones se detallan en el Capítulo V.

4.2.2 Aplicación de los lodos como materia prima de materiales de construcción

Para determinar el potencial de aplicación de los lodos como materia prima de materiales de construcción se comparó sus características físicas y químicas con las de la arcilla. Los resultados de esta comparación se detallan en el Capítulo V.

4.3 Comprobación de la aplicación del lodo de acuerdo a la alternativa seleccionada

Se realizaron ensayos experimentales para comprobar la funcionalidad del lodo como material de construcción. Para esto se elaboraron ladrillos a escala de laboratorio a partir de distintas mezclas de lodo y arcilla. El procedimiento de elaboración de ladrillos fue una adaptación del procedimiento desarrollado por *Tay & et. al. (2004)*, quien evaluó la utilización de lodos residuales, en combinación con arcilla marina, como un nuevo recurso de agregado de construcción.

El procedimiento para la elaboración de ladrillos fue el siguiente: (a) el lodo en estudio y la arcilla se secaron en un horno de convección mecánica a 105° C, este proceso fue necesario debido a que el lodo presenta un alto contenido de humedad, lo que podía afectar la humedad de moldeo de la pieza; (b) el material seco fue triturado en un molino manual y luego tamizado en un tamiz de 250 μm para obtener una uniformidad de las partículas de la mezcla; (c) luego se realizaron mezclas para obtener un ladrillo con un contenido de lodos de 0, 20, 40, 60 y 80% (Tay, 2004), a estas mezclas se agregó una porción de agua de manera de mantener la más alta densidad y formar una pasta maleable; (d) con cada una de las mezclas se moldearon ladrillos cúbicos de aproximadamente 5 cm^3 en moldes de madera; (e) cada ladrillo fue expuesto al sol durante aproximadamente 24 horas o hasta sequedad y luego colocados en un horno de convección mecánica a 105° C para lograr la sequedad total, (f) una vez secos, cada ladrillo fue horneado en un mufla a una temperatura de 1000° C durante 1 hora.

Antes de la elaboración de ladrillos, se realizaron pruebas preliminares, las que consistieron en la realización de pellet con las distintas mezclas lodo-arcilla, esto con el objetivo de determinar que mezclas lodo-arcilla se agrietaban durante la etapa de secado.

Los parámetros de importancia para evaluar la calidad de ladrillos de arcilla son el Porcentaje de Absorción de Humedad y la Resistencia a la Compresión (Tay, 2004). Estos parámetros fueron evaluados en cada una de las piezas elaboradas, además como dato adicional se evaluó la contracción de la pieza ante el secado. Los resultados de la evaluación de la calidad de las piezas elaboradas a partir de las distintas mezclas de lodo y arcilla se presentan en el Capítulo V.

Para realizar el ensayo de la resistencia a la compresión, cada uno de los ladrillos fabricados fue sometido a presión uniforme sobre una de sus caras, por medio de un equipo de compresión el cual mide la fuerza ejercida sobre la pieza. Cada uno de los ladrillos se sometió hasta su rotura y la fuerza hallada se dividió entre el área de la cara para hallar el esfuerzo en el cual ocurre la rotura.

Para el ensayo de absorción de humedad, se procedió a secar los ladrillos durante 24 horas, cerca de los 150 grados centígrados en un horno de convección mecánica, esto para eliminar completamente la humedad, luego se determinó el peso seco de cada uno de los ladrillos, y se sumergieron en agua otras 24 horas, hasta el punto de saturación. Luego de este tiempo cada ladrillo se secó superficialmente y se determinó su peso. Con estos datos se halló el porcentaje de absorción de agua.

V. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de los experimentos realizados de acuerdo a la metodología planteada, así mismo se discuten dichos resultados en base al marco teórico.

5.1 Resultados de la Caracterización de Lodos

A continuación se describen los resultados obtenidos de la caracterización de los lodos estudiados. Cada uno de los análisis realizados a los lodos tiene como fin determinar una alternativa de utilización de los lodos estudiados, los resultados obtenidos fueron comparados con los estándares de la EPA y con valores reportados en la literatura.

5.1.1 Contenido de Humedad y Sólidos en el Lodo

Los lodos de la CCN poseen en promedio 12.08 % de sólidos totales y un contenido de humedad de 87.92%, los resultados obtenidos de cada uno de los muestreos se presenta a continuación, Tabla 5.1.

Tabla 5.1.- Resultados de los Análisis de Sólidos

Parámetro	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	Valor Promedio
Sólidos Totales (%)	12.71	11.72	11.58	12.67	12.64	11.18	12.08
Sólidos Volátiles (% ST)	55.06	59.59	60.91	55.10	55.13	60.92	57.79
Sólidos Fijos (% ST)	44.94	40.41	39.08	44.90	44.87	39.09	42.22
Contenido de humedad (%)	87.29	88.28	88.42	87.33	87.36	88.82	87.92

Del contenido total de sólidos, el 57.79 % corresponde a sólidos volátiles. Este contenido de sólidos volátiles puede provocar atracción de vectores si el lodo es aplicado al terreno sin estabilización previa. Las normas de la EPA recomiendan reducir la cantidad de sólidos volátiles en los lodos hasta un 38%, este porcentaje asegura una disminución en la atracción de vectores una vez que los lodos son aplicados en el suelo. En la Figura 5.1 se describe gráficamente el contenido de sólidos en los lodos.

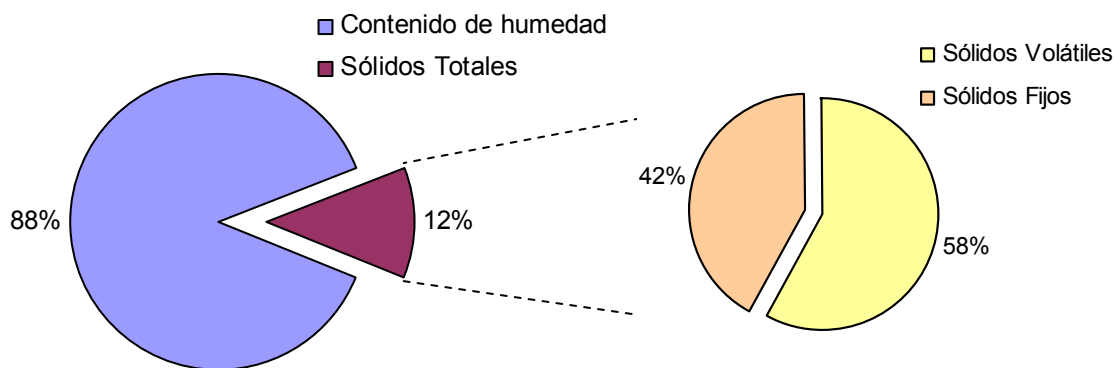


Figura 5.1.- Contenido de Sólidos en el Lodo

5.1.2 pH

El pH promedio de los lodos en estudio es de 6.4. De acuerdo a las normas de la EPA no se debe aplicar al suelo lodos cuyo pH sea menor o igual a 5, lo que indica que el lodo estudiado posee un pH adecuado para la aplicación como abono orgánico. Sin embargo la EPA recomienda un ajuste del pH (mayor que 11), lo que proporciona un control adicional del nivel de patógenos, del potencial de atracción de vectores y, en combinación con suelos neutros o de altos pH, la inhibición de la absorción de metales pesados a través del suelo.

En la Figura 5.2 se representa gráficamente los resultados obtenidos de las mediciones de pH en cada uno de los muestreos.

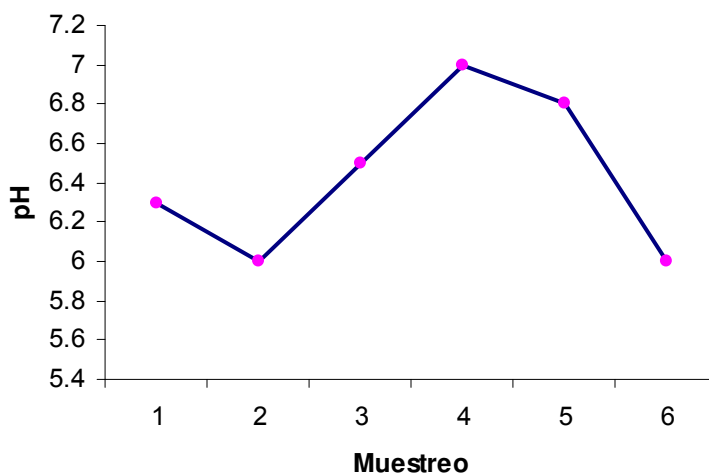


Figura 5.2.- Representación Gráfica de la Fluctuación del pH entre los distintos eventos de muestreo

5.1.3 Patógenos y Parásitos

El análisis de coliformes fecales en los lodos se realizó por medio del procedimiento de tubos múltiples, utilizando tres series de cinco tubos. En general después de la incubación de la muestra en el caldo EC se obtuvo combinaciones de tubos de 5-5-4, 5-5-5, estos códigos de tubos positivos representan un Número Más Probable de 160,000 por cada g de Sólido Total. Así mismo, el resultado de los análisis para Salmonella reflejó códigos de tubos positivos de 5-5-4 en los diferentes muestreos, los que representa un Número Más Probable de 160,000 por cada g de Sólido Total. Los resultados de los análisis de Huevos de Helmintos reflejaron una densidad de 729.33 huevos por cada 4 g de sólido seco de lodo. Los resultados obtenidos para cada uno de los muestreos se presentan a continuación, Tabla 5.2.

Tabla 5.2.- Resultados de los Análisis de Patógenos y Parásitos en Cada uno de los Muestreos Realizados

Parámetro	Coliformes Fecales (NMP/grST)	Bacteria Salmonella SP. (NMP/4g ST)	Huevos de Helminto (Huevos/4g ST)
Muestreo 1	1.6×10^5	1.6×10^5	625
Muestreo 2	1.6×10^5	1.6×10^5	938
Muestreo 3	1.6×10^5	1.6×10^5	625
Muestreo 4	1.6×10^5	1.6×10^5	625
Muestreo 5	1.6×10^5	1.6×10^5	938
Muestreo 6	1.6×10^5	1.6×10^5	625
Valor promedio	1.6×10^5	1.6×10^5	729.33

NMP: Número Más Probable

Los resultados obtenidos de la densidad de patógenos y parásitos en los lodos, dirige a clasificar los lodos en Lodos de Tipo B, esto de acuerdo con los estándares de la EPA (Ver Anexo B, Tabla B.3). Esta clase de lodo requiere ser sometido a tratamiento para reducir la presencia de patógenos por debajo de los niveles detectables, luego de ello pueden ser aplicados al terreno sin restricciones relacionadas a patógenos.

5.1.4 Nutrientes

El porcentaje promedio de nitrógeno para el lodo en estudio, en base a la cantidad de sólidos secos, fue de 5.56%. Este valor se encuentra por encima la concentración típica encontrada en fertilizantes comerciales. Para el fósforo se observa que el valor obtenido experimentalmente es de 7.93%, se encuentra un poco por debajo del porcentaje encontrado en fertilizantes comerciales (ver Tabla 5.3).

Además se observa que el lodo en estudio, posee la presencia de macronutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. En la Tabla 5.3 se presentan los resultados de los análisis de nutrientes y macronutrientes realizados a los lodos.

Las normas de la EPA disponen que los lodos sean aplicados al suelo de acuerdo a la tarifa agrónoma para el nitrógeno, la que está en dependencia del contenido de nitrógeno en el suelo y el nitrógeno disponible en los lodos. El nitrógeno disponible para las plantas presente en los lodos en estudio es de 4,509.09 lb de nitrógeno por cada tonelada de sólido seco, este valor fue calculado mediante la Ecuación 3.1 (ver sección 3.6.1.1).

Tabla 5.3.- Resultados de los Análisis de Nutrientes y Macronutrientes en los Lodos de la CCN y Concentración Típica en Lodos y Fertilizantes

Parámetro	Unidades	Resultado	Concentración Típica en Lodos ¹	Concentración Típica en Fertilizantes ¹
Nitrógeno Total	%ST	5.56	2.4-5	5
Nitrógeno amoniacal	%ST	0.0055	-	-
Nitrato	%ST	0.06	-	-
Nitrógeno Disponible	lbN/ton	4,509.09	-	-
Fósforo Total	%ST	7.93	2.8-11	10
Potasio	%ST	0.25	0.5-0.7	10
Sodio	%ST	1.40	-	-
Magnesio	%ST	0.47	-	-
Hierro	%ST	0.53	-	-
Calcio	%ST	5.93	-	-

¹ Metcalf & Eddy

5.1.5 Metales

La concentración de metales pesados en los lodos representa un parámetro de importancia para evaluar su potencial de aplicación, los metales pesados pueden acumularse en el suelo creando posibles riesgos tóxicos para las plantas y animales.

Los resultados obtenidos de los análisis de metales pesados realizados a los lodos en estudio se presentan en la Tabla 5.4. Los valores obtenidos indican que la concentración de metales cumple con los estándares de la EPA (Ver Anexo B, Tabla B.4), a excepción de los metales arsénico y mercurio. La Figura 5.3 representa gráficamente los resultados obtenidos en comparación con las concentraciones recomendadas por la EPA para cada metal.

Tabla 5.4.- Resultados de los Análisis de Metales Pesados y Concentraciones Límites Aceptadas

Parámetro	Resultados (mg/kg)	Concentración Límite ¹ (mg/kg)
Arsénico	136.75	75.00
Cadmio	N.D.	85.00
Cobre	84.17	4,300
Plomo	N.D.	840.00
Mercurio	1,045.84	57.00
Molibdeno	N.A.	75.00
Níquel	20.08	420.00
Selenio	N.A.	100.00
Zinc	467.69	7,500.00

¹ Estándares para el uso y disposición de lodos de aguas residuales, EPA

N.D.: No Detectado

N.A.: No Analizado

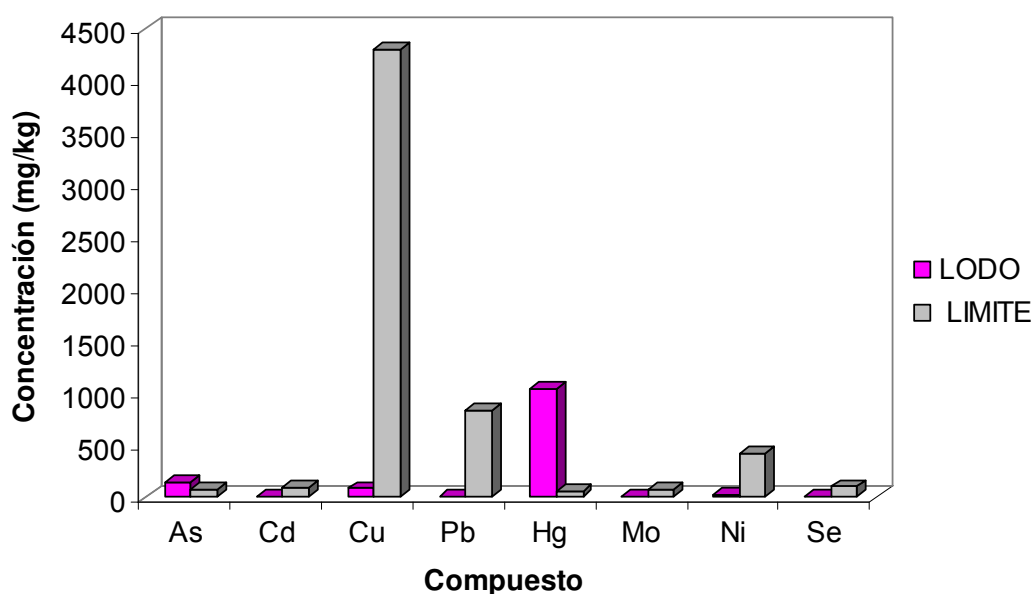


Figura 5.3.- Representación Gráfica de los Resultados Obtenidos de lo Análisis de Metales Pesados en los Lodos y Concentraciones Límites

5.2 Resultados de la Caracterización de Lodos para Evaluar su Potencial de Aplicación como Material de Construcción

5.2.1 Composición química

Los resultados de los análisis realizados para determinar el contenido de óxidos en los lodos en estudios se presentan en la Tabla 5.5, se analizaron los óxidos de mayor concentración en las arcillas.

De los siete óxidos analizados, los óxidos de magnesio, calcio y sodio se encuentran en cantidades superiores a las encontradas en las arcillas. En cambio, el contenido de óxidos de silicio, aluminio, hierro y potasio es bajo en relación al contenido de estos óxidos en las arcillas.

Los óxidos de magnesio y calcio, en cantidades considerables aumenta la porosidad de los productos cerámicos, lo que indica que ladrillos fabricados a partir de los lodos en estudio podrían presentar una alta porosidad, provocando así un mayor porcentaje de absorción de agua y menor resistencia a la compresión.

El óxido de aluminio confiere a las arcillas resistencia a la acción de las altas temperaturas, el bajo contenido de este óxido en los lodos en estudio indica que los ladrillos fabricados a partir del mismo se agrietarían durante la etapa de cocción. La Figura 5.4 representa gráficamente los resultados obtenidos de los análisis de óxidos realizados a los lodos en estudio.

Tabla 5.5.- Resultados de los Análisis de Óxidos en los Lodos en Estudio y Concentraciones Típicas en Arcillas

Parámetro (% ST)	Resultado	C. Huang & et al. (2001)		Abdul G. Liew & et al. (2004)	
		Lodo	Arcilla	Lodo	Arcilla
SiO ₂	23.15	43.42	61.95	29.26	59.98
Al ₂ O ₃	0.53	10.48	16.95	8.46	21.85
Fe ₂ O ₃	0.76	5.51	9.27	2.78	4.51
MgO	0.78	-	-	0.31	0.27
CaO	8.31	0.05	0.45	1.62	0.03
K ₂ O	0.30	0.92	0.14	0.84	3.12
Na ₂ O	1.90	0.52	0.02	0.04	0.30

N.A.: No Analizado

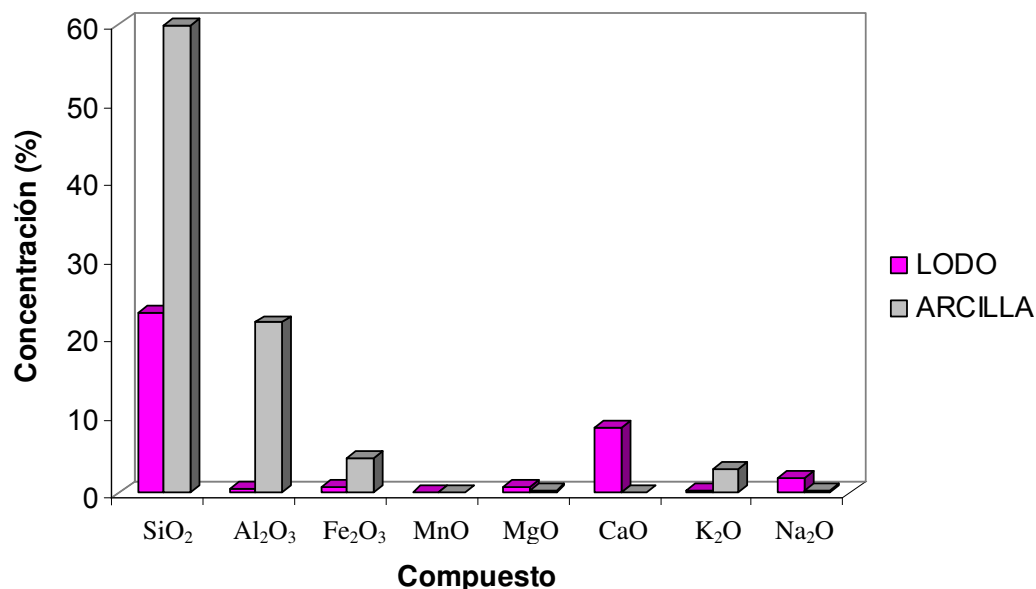


Figura 5.4.- Representación Gráfica de los Resultados Obtenidos de los Análisis de Óxidos en los Lodos y Concentraciones Típica en Arcillas

5.2.2 Plasticidad

El índice plástico del lodo en estudio fue de 45%, lo que indica que el lodo tiene una alta plasticidad (ver sección 3.6.2.2). La industria de la cerámica para la construcción utilizan generalmente arcilla de plasticidad moderada ($7 < \%IP < 15$). Las arcillas con un índice de plasticidad mayor que 15 % se agrietan durante el proceso de secado. El resultado obtenido del índice de plasticidad indica que un artículo fabricado con 100% del lodo estudiado se agrietaría durante la operación de secado, comportamiento que fue comprobada durante la etapa experimental (Ver Figura 5.5).



Figura 5.5- Fotografía de las piezas fabricadas con 100% lodos, luego de la etapa de secado

5.3 Comprobación de la aplicación de los lodos como materia prima de materiales de construcción

Para comprobar la utilización de los lodos como materia prima de materiales de construcción, se elaboraron ladrillos a escala de laboratorio, de acuerdo al procedimiento descrito en la sección 4.3.

En la Tabla 5.6 se resumen los resultados obtenidos de cada una de las pruebas realizadas a las piezas elaboradas con las distintas mezclas de lodo y arcilla. A continuación se discuten estos resultados.

Tabla 5.6.- Resultados de los Análisis Realizados a los Ladrillos Elaborados a Partir de las Distintas Mezclas Lodo/Arcilla

Relación Lodo/Arcilla	Área Lineal Inicial (cm ²)	Área Lineal después del secado (cm ²)	Contracción Lineal (%)	Peso de la Pieza (gr)	Densidad (g/cm ³)	Absorción de Agua (%)	Resistencia a la Compresión (kg/cm ²)
80/20	25	18.48	26.08	164.16	1.31	30.00	24.54
60/40	25	19.35	22.60	172.80	1.38	27.00	58.59
40/60	25	19.80	20.80	216.00	1.73	21.60	80.17
20/80	25	20.25	19.00	270.00	2.16	17.28	111.98
0/100	25	22.09	11.64	300.00	2.40	12.10	205.30

5.3.1 Contracción al Secado

Cada una de las piezas elaboradas con las distintas mezclas de lodo y arcilla, antes del proceso de secado, tenía 25 cm² de área lineal en cada una de sus caras. La contracción lineal de las piezas elaboradas a partir de las distintas mezclas de lodo y arcilla osciló entre 26.08-11.64 %, en función de la disminución del contenido de lodo, esta tendencia se presenta gráficamente en la Figura 5.5.

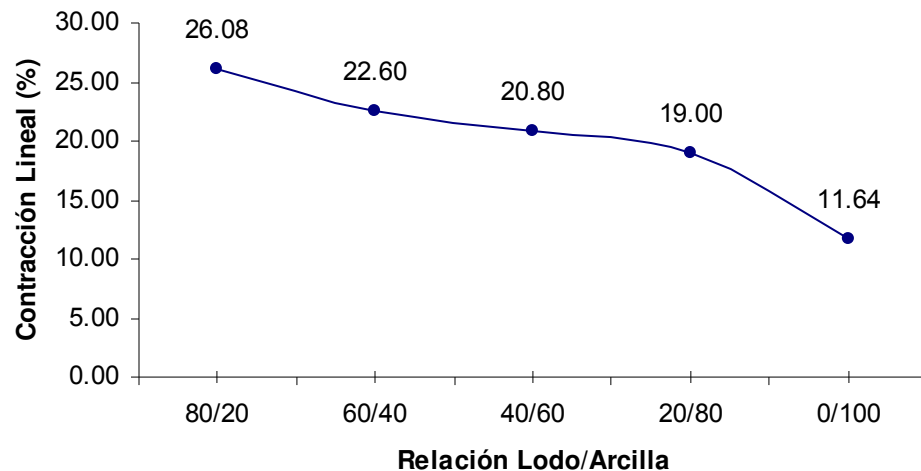


Figura 5.6.- Tendencia de la Contracción Lineal del Ladrillo con Respecto a la Relación Lodo/Arcilla

Se conoce que para diferentes arcillas la contracción lineal oscila entre 2-10% en función del contenido de las fracciones finas, lo que indica que las piezas elaboradas a partir de las mezclas de lodo y arcillas presentaron una alta contracción al secado. En el caso de la pieza elaborada con la mezcla 80% lodo-20% arcilla, la contracción al secado fue muy alta, a medida que se disminuyó el contenido de lodo en la mezcla para la elaboración del ladrillo la contracción disminuyó. La pieza elaborada con la cantidad mínima de lodo (20%) presentó una contracción del 19%. La alta contracción pudo deberse a que la humedad de moldeo fue mayor que el punto óptimo de moldeo.

5.3.2 Absorción de Agua

El porcentaje de absorción de agua de los ladrillos fabricados de las distintas mezclas de lodo y arcilla osciló entre 30 y 12.10 % en relación a la disminución del contenido de lodo. Esta tendencia se presenta gráficamente en la Figura 5.6.

De acuerdo a las Normas Técnicas para Unidades de Arcilla Cocida, Ladrillos y Bloques Cerámicos, que se presentan en el Anexo C, la absorción de agua Máxima de las unidades de mampostería maciza de tipo estructural y no estructural debe ser de 16% para ladrillos utilizados en la construcción de interiores y de 14% para la construcción de exteriores.

En el caso de la pieza elaborada a partir de la mayor cantidad de lodos presentó una alta absorción de humedad, lo que indica que con esta mezcla lodo-arcilla no es funcional la fabricación de ladrillos. A medida que disminuimos la cantidad de lodo y aumentamos la cantidad de arcilla de la mezcla, la absorción del agua tiende a disminuir, así para el ladrillo elaborado con la cantidad mínima de lodo se obtuvo una absorción de humedad un poco mayor a la absorción de humedad máxima para piezas exteriores.

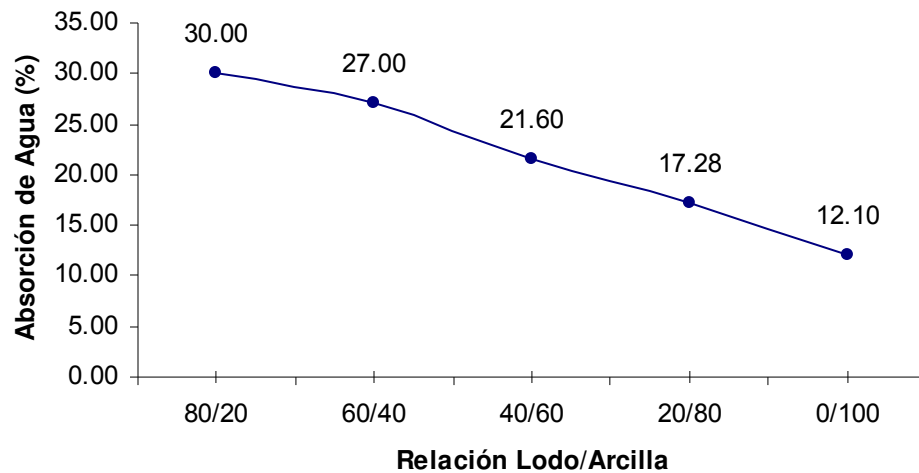


Figura 5.7.- Tendencia del Absorción de Agua del Ladrillo con Respecto a la Relación Lodo/Arcilla

5.3.3 Resistencia a la Compresión

La resistencia a la compresión de los ladrillos fabricados de las distintas mezclas de lodo y arcilla oscila entre 63.13 y 205.30 kgf/cm² con relación a la disminución del contenido de lodo. En la Figura 5.7 se representa gráficamente esta tendencia.

De acuerdo a las Normas Técnicas para Unidades de Arcilla Cocida, Ladrillos y Bloques Cerámicos, que se presentan en el Anexo C, la resistencia mínima a la compresión de las unidades de mampostería maciza de tipo estructural debe ser de 150 kgf/cm², y para unidades de tipo no estructural debe ser de 100 kgf/cm².

En el caso de la pieza elaborada a partir de la mayor cantidad de lodos la resistencia a la compresión fue de 24.54 kgf/cm². A medida que disminuimos la cantidad de lodo y aumentamos la cantidad de arcilla de la mezcla, la resistencia a la compresión aumentó, así para el ladrillo elaborado con la cantidad mínima de lodo se obtuvo una resistencia a la compresión de 111.98 kgf/cm², este resultado se encuentra por encima de la resistencia mínima para unidades de mampostería maciza de tipo no estructural.

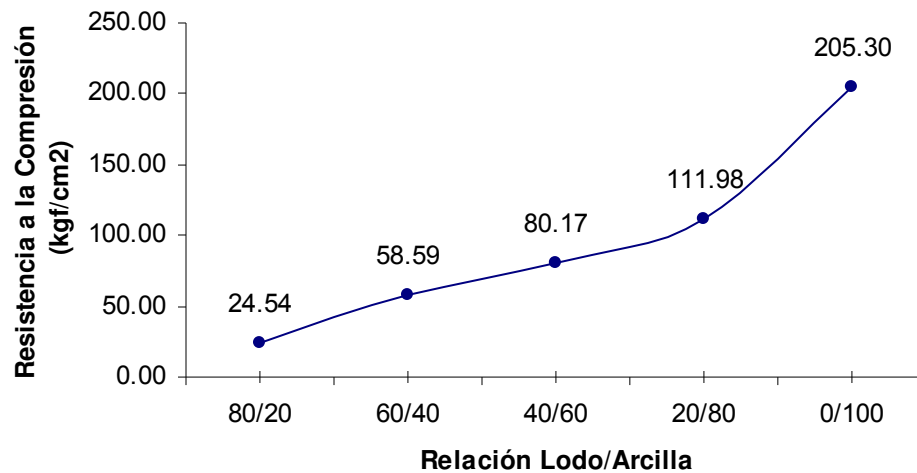


Figura 5.8.- Tendencia de la Resistencia a la Compresión del Ladrillo con Respecto a la Relación Lodo/Arcilla

5.3.4 Relación Óptima Lodo/Arcilla

En la Figura 5.8, se presenta gráficamente la relación de los parámetros de absorción de humedad y resistencia a la compresión con respecto a la relación lodo/arcilla en las mezclas con las cuales se elaboraron los ladrillos.

De acuerdo a esta gráfica a una relación lodo/arcilla de 10/90, se puede elaborar un ladrillo macizo de tipo estructural y no estructural para construcciones interiores. Además, a una relación lodo/arcilla de 27.5/72.5, se obtiene un ladrillo macizo con una resistencia a la compresión igual a la resistencia mínima establecida para piezas de mampostería maciza de tipo no estructural, sin embargo se obtiene una absorción de humedad mayor a la establecidas para unidades de mampostería para interiores.

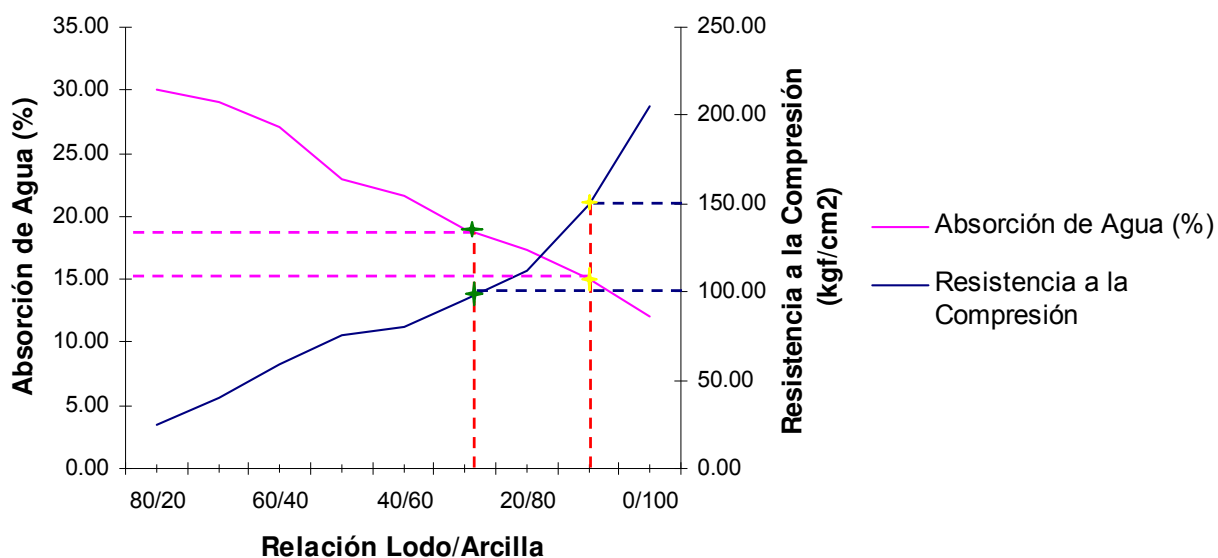


Figura 5.9.- Relación de la Absorción de Humedad y la Resistencia a la Compresión con Respecto a la Relación Lodo/Arcilla

VI. CONCLUSIONES

- Los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Compañía Cervecera de Nicaragua, posee la composición adecuada de materia orgánica, nutrientes y micronutrientes para su aplicación como abono orgánico; sin embargo, la alta concentración de sólidos volátiles, el contenido de patógenos y las concentraciones de Arsénico y Mercurio por encima de las normas de la EPA, limita la aplicación de los lodos como abono orgánico.
- El lodo producido en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Compañía Cervecera de Nicaragua, podrá ser aplicado como abono orgánico una vez que se consiga la eliminación de patógenos y metales para cumplir con los Estándares para el Uso o Disposición de Lodos establecidos por la EPA.
- Las características fisicoquímicas del lodo en estudio indican que éste no puede actuar como sustituto total de las arcillas como materia prima de materiales de construcción. La alta plasticidad y el bajo contenidos de óxidos en los lodos en estudios indican que un ladrillo elaborado con 100% de lodo se agrietaría durante la etapa de secado.
- De acuerdo a las pruebas experimentales realizadas a los ladrillos elaborados a partir de distintas mezclas de lodo y arcilla, en una mezcla de 10% lodo y 90% arcilla se consigue la fabricación de un ladrillo macizo de tipo estructural y no estructural para construcciones interiores.

VII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda tratar el lodo por medio de estabilización alcalina, ya que este método de tratamiento es adecuado para lodos deshidratados, reduce el contenido de patógenos y aumenta el pH del lodo.
- En la actualidad se han estudiado una serie de métodos para la reducción de metales pesados en los lodos de aguas residuales, se recomienda la evaluación de un método para disminuir el contenido de Arsénico y Mercurio en los lodos, para lo cual se propone el método desarrollado por Ito & et. al. (2001), el cual se publicó en la revista Water Science and Technology, Vol. 44.
- Se recomienda realizar una caracterización anual de los lodos producidos en le PTAR para verificar el contenido de sólidos volátiles, patógenos y metales pesados.
- Se recomienda realizar contactos con los fabricantes de ladrillos de arcilla para que utilicen los lodos como sustituto del 10% del total de arcilla requerida durante la elaboración de ladrillos y de esta manera disminuir sus costos en materia prima.
- Se conoce que en países como Japón y Estados Unidos, se han utilizado lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua como materia prima del cemento Pórtland, por lo que se recomienda la realización de estudios monográficos para evaluar la aplicación del lodo como materia prima del cemento Pórtland en nuestro país.

VIII. ABREVIATURAS

CCN:	Compañía Cervecera de Nicaragua
CIC:	Capacidad de Intercambio Catiónico
COT:	Carbono Orgánico Total
DBO:	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO:	Demanda Química de Oxígeno
EPA:	Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental)
FAFA:	Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente
IP:	Índice de Plasticidad
pH:	Potencial de Hidrógeno
PTAR:	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
UASB:	Upflow Anaerobic Sludge Bed (Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente)

IX. BIBLIOGRAFÍA

Apha, Awwa, Wpcf, (1992), Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Ediciones Diaz de Santos, S. A.

Álvarez, Sergio, *et al.*, (2002). Estudio de arcillas, desarrollo de una metodología de ensayos y pruebas para la selección de materiales arcillosos en la construcción de estufas mejoradas. Trabajo de tesis para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Ingeniería.

Baldizón, M.E. (2002). Apuntes de Ingeniería Sanitaria. Universidad Nacional de Ingeniería. Nicaragua.

Blanco, Edith. & *et. al.*, Uso de Lodos Sobrenadantes Provenientes de Lagunas de Estabilización como Acondicionador del Suelo. Universidad de Zuliam, Centro de Investigación del Agua – INPELUZ, Facultad de Ingeniería, Facultad Experimental de Ciencias Maracaibo – Venezuela. 2004.

D'León, Farley, *et al.*, (2003). Evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales del Consorcio Cervecerero Centroamericano, S.A. Trabajo de tesis para optar al título de Ingeniero Químico. Universidad Nacional de Ingeniería.

Huang, C., *et al.*, (2001). Reuse of water treatment plant sludge and dam sediment in brick-making, Water Science and Technology, Vol 44, N° 10, pág. 273–277. IWA Publishing.

Kerali, Anthony G., (2001). Durability of compressed and cement-stabilised building blocks. Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering. University of Warwick, School of Engineering.

Liew, Abdul G., *et al.*, (2004). Incorporation of sewage sludge in clay brick and its characterization. Waste Management and Research, pág 226-233. IWA Publishing.

Manejo de lodos no peligrosos generados en plantas de tratamiento de aguas. Comisión Nacional del Medio Ambiente. República de Chile, 2000.

Metcalf y Eddy, Inc., (1995). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Editorial McGraw-Hill, Tercera Edición. España.

National Research Council of the National Academies, (2002). Biosolids Applied to land. Advancing Standards and Practices. National editorial academies Press. United States.

Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental- Lodos y Biosólidos- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

Norma UNE 67019:1996 EX. Definiciones, clasificación, especificaciones y designación de los ladrillos de arcilla cocida utilizados en la construcción.

Oakley, Stewart, (1997). Manual: Diseño, Operación y Mantenimiento para lagunas de estabilización en Honduras. Fondo hondureño de inversión social.

Okuno, N., *et al.*, (2004). Utilization of Sludge in building material. Water Science and Technology, Vol. 49, N° 10, pag. 225-232. IWA Publishing.

Process Design Manual, Land Application of Sewage Sludge and Domestic Septage, (1995). EPA/625/K-95/001. Environmental Protection Agency USA.

Romero R., Jairo A., (2002). Tratamiento de Aguas residuales, Teoría y principios de diseño. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia.

Romero R., Jairo A., (1999). Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización. Editorial Alfaomega. Colombia.

Standard specification for transportation materials and methods of sampling and test, (1990). American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Fifteen edition.

Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge. 40 CFR parts 503. Environmental Protection Agency USA. Federal Register March 28, 2001.

Tay, J. H, *et al.*, (2004). Reuse of wastewater sludge with marine clay as a new resource of construction aggregates. Water Science and Technology, Vol 50 N° 9, pág 189–196. IWA Publishing.

Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods, (1986). EPA Publication SW-846, Third edition.

Wastewater and Biosolids Analysis Manual. Digestion and Selected Methods for Determining Metals, Minerals, and Other Related Parameters, (1999). Hach Company.

Winkler, Michael A., (1998). Tratamiento biológico de aguas de desecho. Editorial Limusa, México.

ANEXO A:

MÉTODOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS LODOS DE AGUAS RESIDUALES

A.1. DETERMINACIÓN DEL PESO VOLUMÉTRICO DE LODOS (Norma oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002)

- a) Para determinar el peso volumétrico del lodo se utilizan recipientes limpios, sin abolladuras. La báscula empleada deberá estar nivelada.
- b) Se pesa el recipiente vacío, tomando este peso como la tara del recipiente. Se llena hasta el tope con el lodo homogeneizado.
- c) El recipiente se golpea contra el suelo dejándolo caer desde una altura de 10 cm. Llenar hasta el tope teniendo cuidado de no presionar al colocarlo en el recipiente, esto con el fin de no alterar el peso volumétrico que se pretende determinar.
- d) Es importante vaciar dentro del recipiente todo el material, sin descartar los finos. Para obtener el peso neto del lodo, se pesa el recipiente con éstos y se resta el valor de la tara. Cuando no se tenga suficiente cantidad de material para llenar el recipiente se marca en éste la altura alcanzada y se determina dicho volumen.
- e) El peso volumétrico del lodo se calcula mediante la siguiente fórmula

$$P_v = P/V \qquad \text{Ec. A.1.1}$$

donde:

P_v	=	Peso volumétrico del lodo, en kg/m^3
P	=	Peso del lodo (peso bruto menos tara), en Kg
V	=	Volumen del recipiente, m^3

A.2. ANÁLISIS DE SÓLIDOS TOTALES, FIJOS Y VOLÁTILES EN LODOS DE AGUAS RESIDUALES

A.2.1 Sólidos Totales

A.2.1.1 Preparación de la cápsula de evaporación

- a) Si van a medirse sólidos volátiles incinérse una cápsula limpia en una mufla durante una hora a una temperatura de $550 \pm 50^\circ \text{C}$.
- b) Si solamente se desea medir la cantidad de sólidos totales, caliéntense una cápsula limpia en un horno durante una hora a una temperatura de 103 a 105°C .
- c) Enfríese la cápsula en un desecador y luego pésela, conserve la cápsula en el desecador hasta el momento de utilizarla.

A.2.1.2 Análisis de la muestra

- Muestra líquidas

- a) Si la muestra contiene bastante humedad que le permita fluir más o menos fácilmente, agita la muestra con la ayuda de un agitador magnético hasta homogenizarla, coloque de 25 a 50 g de la muestra en la cápsula de evaporación previamente preparada y pese.
- b) Evapore la muestra al estado seco en un baño de agua y luego séquese en un horno a una temperatura de 103 a 105°C durante una hora.

- c) Enfríe la muestra en un desecador hasta temperatura ambiente y luego pese.
- d) Repita el procedimiento de secado, enfriamiento y desecación hasta obtener un cambio en el peso medido de al menos el 4% o 50 mg.
- e) Realice duplicados de al menos el 10 % del total de la muestra. Las determinaciones duplicadas deben concordar dentro del 5% del peso promedio.

- Muestras Sólidas

- a) Si la muestra consiste en pedazos discretos de material sólido, pulverice la muestra. Tome de 25 a 50 g en una cápsula de porcelana preparada previamente y pese.
- b) Coloque la muestra en un hormo a 103-105° C toda la noche. Enfríese la muestra hasta temperatura ambiente y pese. Repita el procedimiento hasta obtener un peso que no varíe más del 4% o 50 mg. Analice por lo menos el 10% de toda la muestra en duplicado.

A.2.2 Sólidos fijos y volátiles

- a) Transfiera los residuos secos del procedimiento de determinación de sólidos totales a una mufla, caliente el horno a 550° C durante una hora.
- b) Si el residuo contiene grandes cantidades de materia orgánica, primero encienda la muestra sobre un mechero de gas dentro de una campana extractora de gases en la presencia del aire adecuado para disminuir las pérdidas de muestra y evitar olores en el laboratorio. Enfríe en un desecador hasta temperatura ambiente y pese.
- c) Repita el calentamiento (30 min), enfríe y pese la muestra de nuevo hasta alcanzar una reducción del peso de hasta el 4% o 50 mg. Analice al menos el 10% del total de la muestra formando duplicados. Las determinaciones duplicadas deben concordar dentro del 5% del peso promedio.

A.2.3 Cálculos de sólidos totales, volátiles y fijos

$$\% \text{Sólidos Totales} = \frac{(A - B) \times 100}{C - B} \quad \text{Ec. A.2.1}$$

$$\% \text{Sólidos Volátiles} = \frac{(A - D) \times 100}{A - B} \quad \text{Ec. A.2.2}$$

$$\% \text{Sólidos Fijos} = \frac{(D - B) \times 100}{A - B} \quad \text{Ec. A.2.3}$$

$$\% \text{Humedad} = \frac{[(C - B) - (A - B)] \times 100}{(C - B)} \quad \text{Ec. A.2.4}$$

donde :

A = Peso del residuo seco más el peso de la cápsula (g)
 B = Peso de la cápsula (g)

- C = Peso de la muestra húmeda (g)
D = Peso del residuo más la cápsula después de la incineración (g)

A.3. DETERMINACIÓN DEL PH EN LODOS DE AGUAS RESIDUALES

- Coloque 20 g de lodo en un beaker de 50 mL, agregue 20 ml de agua destilada, cubra el beaker, y revuelva continuamente la suspensión durante 5 minutos. Se permiten diluciones adicionales si se trabaja con lodos higroscópicos.
- Ponga en reposo la suspensión durante 1 h para que la mayoría del material suspendido sedimente, también puede filtrar o centrifugar la suspensión.
- Sumerja el electrodo en la parte clara de la suspensión.
- Si la temperatura de la muestra difiere por más que 2° C de la solución tapón, los valores de pH medidos deben ser corregidos.
- Reporte los resultados como el pH del lodos medido en agua y la temperatura a la cual la prueba fue realizada.

A.4 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD

A.4.1 Determinación del límite líquido

A.4.1.1 Procedimiento

- Tomar una muestra representativa de la muestra, previamente secada a 60° C y se muele en un mortero a fin de desmenuzar los grumos que contenga hasta obtener entre 100 y 200 g de suelo que pase por un tamiz 0.425 mm (N° 40).
- Se cuartea el material y se coloca entre 100 y 200 g en una cápsula de porcelana y se le añade de 15 a 20 mL agua destilada mezclándola con una espátula hasta formar una pasta uniforme. Si es necesario adicionar más agua para conseguir una pasta uniforme, esto se hará en incrementos de 1 a 3 mL, amasando y removiendo la mezcla antes de cada adición de agua.
- Cuando la se agregado el agua suficiente para formar una masa uniforme de consistencia tiesa.
- Una porción de la muestra ya preparada se coloca en la cápsula de latón de un aparato de Casagrande, dispositivo para medir el límite líquido, con ayuda de una espátula, presionando la superficie para que quede plana y con un espesor máximo de 1 cm, se deben prevenir la trampa de burbujas de aire dentro de la masa.
- Se coloca la punta del ranurador en la parte superior y al centro de la muestra perpendicular a la superficie inferior de la cápsula de latón.
- Se hace una ranura en el centro de la muestra de manera que permanezca perpendicular a la superficie inferior de la cápsula de latón. Si el ranurador no puede correr a través de la pasta sin rajar los bordes de la ranura, se deben realizar los cortes con una espátula y se verifican las dimensiones con el ranurador.
- La cápsula que contiene la muestra preparada será levantada y dejada caer dando vuelta a la manivela del dispositivo a razón de 2 revoluciones por segundo, contando el número de revoluciones requeridas hasta que cierre el fondo de la ranura en una

distancia de 13mm. Si la muestra tiende a resbalar en la superficie de la taza en vez de fluir, será necesario agregar más agua a la muestra y ser remezclada.

- h) Se procede a tomar una de la muestra entre 15 y 20 g en el lugar donde se unió con ayuda de una espátula, y se colocará en una cápsula para determinar el contenido de humedad de la porción de muestra, secando al horno hasta un peso constante a $110 \pm 5^\circ \text{C}$.
- i) La muestra remanente en la cápsula de latón será transferida a una cápsula de porcelana. La cápsula de latón, el ranurador y la espátula serán lavados y secados para el ensayo siguiente.
- j) Las operaciones precedentes serán repetidas para por lo menos dos porciones adicionales de la muestra, a la cual se le agregado suficiente agua para llegar a una condición más fluida. El objeto de este procedimiento es obtener muestras de tal consistencia que por lo menos una determinación será hecha en cada uno de los rangos siguientes de choques: 25-35, 20-30, 15-25, así que los rangos en las tres determinaciones es por lo menos 10 choques.

A.4.1.2 Cálculo de límite líquido

- a) Se calculan las humedades de cada paso correspondientes al número de golpes obtenidos por el aparato mediante la fórmula:

$$\text{porcentaje de humedad} = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de suelo secado al horno}} \times 100$$

Ec. A.4.1

- b) Una “curva de flujo” que representa la relación entre el contenido de agua y el número correspondiente de choques será trazada en un gráfico semilogarítmico, con el contenido de agua como abscisas en la escala aritmética, y el número de choques

como ordenadas en la escala logarítmica. La curva del flujo será una línea recta dibujada casi como sea posible a través de tres o más puntos trazados.

- c) El contenido de agua correspondiente a la intersección de la curva de flujo con la ordenada de 25 choques será tomado como el límite líquido de la muestra. Reporte este valor redondeando al número entero más cercano.

A.4.2 Determinación del Límite Plástico

A.4.2.1 Procedimiento

- a) Utilizar 8 g de la masa del ensayo del límite líquido, preferiblemente la que corresponde a los puntos de mayor número de golpes para que no tenga mucha humedad.
- b) Amasar la muestra entre las manos y luego hacerla rodar con la palma de la mano la base del pulgar sobre la superficie de amasado conformando un cilindro solo con el peso de mano. Cuando el cilindro alcance un diámetro de aproximadamente 3 mm,

doblar, amasar nuevamente y volver a conformar el cilindro; repetir la operación hasta que el cilindro se disgregue al llegar a un diámetro de aproximadamente 3 mm, en trozos de orden de 0.5 a 1 cm de largo, y no pueda ser reamasado ni reconstruido.

Nota 1: Si esta disgregación se produce cuando tiene un diámetro mayor que 3 mm, puede considerarse como un punto final satisfactorio siempre que el material haya podido conformar previamente un cilindro de 3 mm. En ningún caso debe procurarse obtener la disgregación exactamente a los 3 mm de diámetro de cilindro (por ejemplo reduciendo la velocidad y/o la velocidad del amasado).

c) Reunir las fracciones del cilindro disgregado y colocarlas en un recipiente tarado.

d) Determinar y registrar su humedad de acuerdo.

e) Repetir las etapas anteriores con dos porciones más de la muestra.

Nota 3: Se recomienda efectuar las tres determinaciones tratando de conseguir una humedad ligeramente mayor que el límite y ligeramente menor que el límite, respectivamente.

A.4.2.2 Cálculo del límite plástico

Calcular el límite plástico como el promedio de las tres determinaciones efectuadas sobre la muestra de ensaye. Dichas determinaciones no deben diferir entre si en más de 2 puntos. Cuando no se cumpla esta condición se debe repetir todo el ensayo.

A.4.3 Cálculo del índice plasticidad

a) El índice plasticidad de determina de acuerdo a la ecuación 5.2 descrita en el capítulo cinco de este documento.

Cuando no pueda determinarse uno de los dos límites (W_L ó W_P). o la diferencia es negativa, informar el índice de plasticidad como **NP** (no plástico).

A.5 NITRÓGENO TOTAL KJELDAHL (MÉTODO 8075 HACH, MÉTODO NESSLER)

A.5.1 Resumen del método

El nitrógeno total Kjeldahl (también llamado proteína cruda) se refiere a la combinación del nitrógeno amoniacal y nitrógeno orgánico integrados por el nitrógeno trinegativo. Estos compuestos son convertidos en las sales de amonio por la acción del ácido sulfúrico y del peróxido de hidrógeno. Las sales de amoníaco más cualquier presencia de amoníaco son analizadas por una prueba modificada del método de Nessler. El agente de dispersión del alcohol de polivinilo ayuda a la formación del color en la reacción del reactivo de Nessler con los iones del amonio. La formación de un color amarillo, es proporcional a la concentración del amoníaco.

A.5.2 Digestión de la muestra

a) Transfiera 0.50 g o menos de la muestra ya homogenizada de lodo en un frasco de digestión de 100-mL; La cantidad de muestra a utilizar depende de la concentración de

nitrógeno esperada de acuerdo con la tabla #A.8.1. Para homogenizar las muestras sólidas se deben moler y mezclar bien.

Tabla #A.5.1: Cantidad de muestra a utilizar según la concentración de nitrógeno esperada

Concentración de nitrógeno esperada (mg/kg)	Cantidad de muestra (g)	Volumen del análisis (mL)	Diluir a (mL)
30-2250	0.5	10	25
75-5620	0.4	5	25
250-18,750	0.3	2	25
750-56,250	0.2	1	25
3000-225,000	0.1	0.5	25

- b) Agregue 4 ml de ácido sulfúrico concentrado al frasco de digestión.
- c) Ajuste la temperatura del aparato de digestión a 440° C. Cuando se alcanza la temperatura apropiada, circule el agua al aspirador y cerciórese de que hay succión a la columna de fraccionamiento.
- d) Hierva la muestra durante 4 minutos. No hierva hasta sequedad, si el ácido sulfúrico no está presente en el frasco después del período de ebullición, deseche la muestra y utilice más ácido sulfúrico para el procedimiento de la digestión. O elija una cantidad más pequeña de la muestra. Si la muestra hace demasiada espuma utilice una temperatura de 335° C. Continúe la ebullición a esta temperatura hasta que se evapore toda el agua. Luego vuelva a la temperatura original de la digestión. Nota: Los vapores ácidos blancos acompañados con una línea del reflujo indican que el ácido sulfúrico está hirviendo. No proceda si el ácido sulfúrico no es visible en el frasco.
- e) Agregue 10 ml de peróxido de hidrógeno al 50% a la muestra por medio del embudo en la columna de fraccionamiento del digestor. No caliente hasta la sequedad. Si la muestra digestada vira de color, agregue incrementos de 5 ml del peróxido hasta que llega a estar clara o no cambie de color. Si la muestra hace espuma excesivamente durante la adición del peróxido de hidrógeno, pare el flujo del peróxido y quite el frasco de digestión y la columna de fraccionamiento. Enfríe por 30 segundos y comience de nuevo la calefacción. Comience la adición del peróxido con 2 ml, después siga con el peróxido restante.
- f) Después de que la adición del peróxido de hidrógeno sea completa, hierva el exceso de peróxido de hidrógeno calentando hasta que el ácido comience a fluir otra vez y los vapores blancos sean visibles. Repita la digestión desde el comienzo usando una muestra nueva.
- g) Retire el frasco del calentador y enfríelo al ambiente. Quite la columna de fraccionamiento del frasco de la digestión. No agregue el agua al frasco hasta que este frío.
- h) Diluya el resultado de la digestión hasta 100 ml con agua desionizada. Nota: Agregue el agua desionizada lentamente al principio.
- i) Si la muestra tiene turbiedad visible, fíltrela o espere hasta que la turbiedad sedimente, y la porción superior de la muestra este clara. Para filtrar, coloque el papel de filtro de

cristal de 47 mm en el sostenedor del filtro con la superficie arrugada hacia arriba. Ponga el montaje del sostenedor del filtro en el matraz de filtración y moje el filtro con agua desionizada para asegurar la adherencia al sostenedor. Mientras aplica vacío al matraz de filtración, transfiera la muestra al aparato de filtración. Nota: Si se analizan partes alícuotas pequeñas (≤ 1.0 ml), la filtración no es necesaria.

- j) Digerir una cantidad igual de agua desionizada como blanco, siguiendo el mismo procedimiento.

A.5.3 Determinación de Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)

- a) Mida con una pipeta 25 mL de la muestra y un blanco de agua desionizada.
- b) Agregue una gota de indicador de NTK a cada cilindro. Agregue KOH al 8,0 N gota a gota a cada cilindro, mezclando después de cada adición. Continúe hasta que el primer color azul sea visible.
- c) Llene ambos cilindros hasta 20 mL con agua desionizada.
- d) Agregue 3 gotas del estabilizador mineral a cada cilindro. Invierta varias veces los cilindros para mezclar. Agregue 3 gotas de agente de dispersor de alcohol polivinílico a cada cilindro. Invierta varias veces para mezclar.
- e) Llene ambos cilindros hasta 25 mL con agua desionizada.
- f) Mida con una pipeta 1 ml de reactivo de Nessler a cada cilindro. Tape e invierta los tubos en varias ocasiones. La solución no debe ser nebulosa: Cualquier alcalinidad (o turbiedad) causará resultados incorrectos. La reacción tomará alrededor de dos minutos.
- g) Después del período de reacción, vierta el contenido de cada cilindro en celdas separadas de 25mL de capacidad.
- h) Coloque el blanco en el colorímetro y cerrar el instrumento.
- i) Coloque la muestra preparada en el colorímetro, la lectura será en mg/l de NTK.

A.5.4 Cálculos

$$NTK(mg/kg) = \frac{Ax75}{BxC} \quad \text{Ec. A.5.1}$$

donde:

- A = Concentración leída del instrumento (mg/L)
 B = Cantidad de muestra utilizada (g)
 C = Volumen del análisis de la tabla (mL)

El 75 de la fórmula se deriva de un factor de multiplicación usando el volumen teórico de 25 mL de volumen de digestión y 3 mL de volumen de análisis y 3 mL.

A.6 DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO AMONICAL (MÉTODO 10031 HACH, SILICILATO)

A.6.1 Resumen del método

Los compuestos del amoníaco se combinan con clorina para formar monochloramino. El monochloramino reacciona con el salicilato a la forma 5-aminosalicilato. El 5-aminosalicilato se oxida en la presencia de un catalizador del nitroprusido del sodio para formar un compuesto azul coloreado. El color azul es enmascarado por el color amarillo de exceso del reactivo presente para dar una solución verde.

A.6.2 Procedimiento

- Remueva los tapones de dos viales que contiene el reactivo diluyente de AmVer Hach de alto rango. Agregue 0.1 ml de muestra a uno de los viales. Agregue 0.1 ml de agua libre de amoníaco al otro vial.
- Agregue el contenido de una bolsa de polvo del reactivo salicilato de amoníaco para 5 mL de muestra a cada vial.
- Agregue el contenido de una bolsa de polvo del reactivo Cianurato de amoníaco para 5 ml de la muestra en cada vial.
- Tape los frascos firmemente y sacúdalos para disolver el polvo. Si el amoníaco está presente se presentará un color verde.
- Espere 20 minutos, lo cual es el tiempo que toma la reacción.
- Proceda a realizar las mediciones de absorbancia en un espectrofotómetro, para esto limpie el exterior del vial con una toalla. Nota: El limpiar con un paño húmedo, seguido por uno seco, quita huellas digitales y otras marcas. Cere el instrumento colocando primeramente la muestra en blanco. Luego coloque la vial que contiene la muestra preparada y lea la absorbancia.
- Para comprobar la exactitud del método utilice un estándar de nitrógeno amoniacal a 10 mg/L.

A.6.3 Cálculos

$$NH_3 - N(mg/kg) = \frac{Ax1000}{B} \quad \text{Ec. A.6.1}$$

donde:

A = Concentración leída del instrumento (mg/L)
 B = Dilución de la muestra sólida (g/L)

A.7 DETERMINACIÓN DE NITRATO (MÉTODO 8039 HACH, REDUCCIÓN DE CADMIO)

A.7.1 Resumen del Método

El cadmio metálico reduce a nitritos los nitratos de la muestra. El ion de nitrito reacciona en un medio ácido con el ácido sulfanílico para formar una sal intermedia de diazonio. Esta sal se une al ácido géntísico para formar un producto de color ámbar.

A.7.2 Procedimiento

- Llene una celda de muestra con 25 ml de muestra. Se debe determinar un blanco reactivo en cada lote nuevo de NitraVer 5. Restar este valor de cada resultado obtenido con este lote de reactivo.
- Agregue el contenido de una bolsa de polvo de reactivo de nitrato NitraVer 5 a la celda (la muestra preparada). Tapar.
- Agitar la celda enérgicamente durante un minuto.
- Después de sacudir, comenzará un período de reacción de 5 minutos. Si hay nitrato, se desarrollará un color ámbar.
- Durante el período de la reacción, llene otra celda de muestra con 25 ml de muestra (el blanco).
- Coloque el blanco en el soporte de la celda del equipo colorimétrico para cerar el equipo. Cerrar el escudo para la luz.
- Colocar la muestra preparada en el soporte de la celda, cerrar el escudo para la luz. Lea el nitrógeno de nitrato en mg/l.

A.7.3 Cálculos

$$NO_3^- - N(mg/kg) = \frac{Ax1000}{B} \quad \text{Ec. A.7.1}$$

donde:

- A = Concentración leída del instrumento (mg/L)
B = Dilución de la muestra sólida (g/L)

A.8 FÓSFORO TOTAL (MÉTODO 8190 HACH, MÉTODO DE PHOSVER3, DIGESTIÓN CON PERSULFATO ÁCIDO)

A.8.1 Resumen del Método

La presencia de fosfato en forma orgánica e inorgánica condensada debe convertirse a ortofosfato reactivo antes del análisis. El pretratamiento de la muestra con ácido y calor proporcionan las condiciones para hidrólisis de las formas inorgánicas condensadas. Los fosfatos orgánicos se convierten a ortofosfatos calentándolos con ácidos y persulfato.

El ortofosfato reacciona con molibdato en un medio ácido para producir un compuesto de fosfomolibdato. El ácido ascórbico luego reduce el compuesto, produciendo un color azul intenso de molibdeno.

A.8.2 Procedimiento

- a) Seleccione la cantidad de la muestra de las tablas #A.11.1 y realice la digestión de la muestra de acuerdo a la sección A.8.2.

Tabla #A.8.1: Cantidad de muestra a utilizar según la concentración de PO₄ esperada

Concentración de PO ₄ esperada (mg/kg)	Cantidad de muestra (g)	Volumen del análisis (mL)	Diluir a (mL)
12.5-625	0.5	8.00	10
32-1560	0.4	4.00	10
85-4150	0.3	2.00	10
625-31250	0.2	0.40	10
2500-125000	0.1	0.20	10

- b) Use el volumen del análisis de la tabla A.11.1 y colóquelo en una probeta, si el volumen del análisis es mayor que 0.20 mL ajuste el pH a 8.2. Diluya hasta 10 mL.
- c) Llene otra probeta con 10 mL de agua desionizada, la cual funcionará como blanco.
- d) Agregue el contenido de un bolsita de PhosVer3 a cada probeta y muezcle. Se desarrollará un color azul si el fósforo está presente.
- e) Vierta el contenido de cada cilindro dentro de una celda de 10 mL.
- f) Comenzará un período de reacción de 2 minutos. Después de este tiempo coloque el blanco en el colorímetro y cere el instrumento.
- g) Coloque la muestra en el colorímetro y lea la concentración de fósforo total en mg/L PO₄⁻³.

Nota: Para las muestras sólidas, expresar los resultados como mg/kg, no mg/l.

A.8.3 Cálculos

$$\text{Fósforo total(mg/Kg)} = \frac{A}{B * C} * 1 \times 10^6 \quad \text{Ec. A.8.1}$$

donde:

- A = Lectura del instrumento (mg/L)
- B = Cantidad de la muestra (g) de la tabla
- C = Volumen del análisis (ml) de la tabla

A.9 MÉTODO PARA LA CUANTIFICACIÓN DE COLIFORMES FECALES EN LODOS

A.9.1 Preparación del agua de dilución

- Solución madre de tampón A
 - a) Disolver 34 g de fosfato monopotásico (KH_2PO_4) en 500 ml de agua destilada, ajustar el pH a 7.2 ± 0.2 con una solución de hidróxido de sodio de 1N y aforar a 1L de agua destilada.
 - b) Esterilizar en autoclave a 121°C , durante 15 minutos y almacenar en refrigeración (entre 2 y 4°C). La solución es estable durante meses. Desechar cuando se observe turbiedad
- Solución madre de tampón B
 - a) Disolver 8.1 g de cloruro de magnesio hexahidratado ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) en 500 ml de agua destilada y aforar a 1 L con agua destilada.
 - b) Esterilizar en autoclave a 121°C durante 15 minutos. Almacenar en refrigeración (entre 2 y 4°C).
- Solución tampón de fosfato (agua de dilución)
 - a) Adicionar 1.25 ml de la solución madre de tampón A y 5 mL de la solución madre de tampón B y aforar a 1 L con agua destilada.
 - b) Distribuir volúmenes de 9.2 ml y 36 ml en tubos de rosca y frascos con tapa de cierre hermético, respectivamente.
 - c) Esterilizar en autoclave a 121°C , durante 15 minutos y almacenar a temperatura ambiente.

A.9.2 Preparación de la muestra

- a) Suspender X g de materia fresca que corresponda a 4 g de sólidos totales en 36 mL de agua de dilución y así obtener una dilución de 10^{-1} .
- b) Mezclar durante 2 a 3 minutos, con ayuda de una parrilla de agitación, a velocidad baja (800 rpm), hasta la completa disolución.

A.9.3 Preparación de diluciones

Por el origen de la muestra se requieren inóculos menores a 1 mL, utilizando diluciones seriadas de submúltiplo de 10.

- a) Se preparan diluciones decimales seriadas a partir del homogeneizado resultante (10^{-1}) lo antes posible, reduciendo al mínimo la sedimentación. Transferir 1 mL en 9 mL de agua de dilución (10^{-2}) y así sucesivamente hasta obtener la dilución deseada.
- b) Cada dilución debe ser homogeneizada perfectamente agitando 25 veces en 7 segundos, haciendo un arco con la muñeca de 30 cm de arriba abajo o con un sistema de agitación

que proporcione resultados equivalentes. Es importante efectuar la agitación siempre de la misma manera, para obtener resultados comparables.

- c) Se debe utilizar una pipeta estéril diferente para cada una de las diluciones decimales subsecuentes. Para aforar el líquido de la pipeta, deberá aplicarse la punta de ésta en el interior del cuello manteniéndola en posición vertical, inclinando el tubo. Nunca se debe introducir, a la muestra, más de la tercera parte de la pipeta.
- d) Si una muestra o un lote de muestras va a ser analizado por primera vez, utilizar al menos cuatro series de tres (o cinco) tubos cada una, posteriormente tres series de tres tubos serán suficientes.

A.9.4 Preparación de los medios de cultivos

- Medio Lauril triptosa

- a) Disuelva 35.6 g del medio de lauril triptosa que se encuentra en forma deshidratada en el mercado en 1 L de agua destilada.
- b) Verificar que el pH sea de 6.8 ± 0.2 en caso contrario ajustar con una solución de hidróxido de sodio 0.1 N.
- c) Distribuir en volúmenes de 10 mL en tubos de ensayo, conteniendo viales invertidos. También es posible prescindir del vial invertido a añadir 0.01 g/L de púrpura de bromocresol al medio presuntivo para determinar la producción de ácido.
- d) Tapar con tapones de acero inoxidable y esterilizar en autoclave a 121°C , durante 15 minutos. El medio ya una vez preparado puede almacenarse a temperatura ambiente, en un lugar limpio y libre de polvo, durante no más de una semana.

Nota: Hágase el medio de lauril triptosas con fuerza suficiente como para que al añadir 100 mL o 10 ml de la muestra, la concentración de los ingredientes no sea menor que la del medio estándar, ver tabla A.12.1.

Tabla #A.9.1: Preparación del medio líquido de lauril triptosa

Inóculo, ml	Cantidad de medio en el tubo, ml	Volumen del medio + inóculo, ml	Medio líquido triptosa deshidratado necesarios g/l
1	10 o más	11 o más	35.6
10	10	20	71.2
10	20	30	53.4
100	50	150	106.8
100	35	135	137.1
100	20	120	213.6

- Medio EC

- a) Para la preparación del medio EC, disolver 37 g del medio que se encuentra en forma deshidratada en el mercado, con la ayuda de una parilla de agitación, en 1L de agua

destilada. Verificar que el pH sea de 6.9 ± 0.2 en caso contrario ajustar con una solución de hidróxido de sodio, 1N.

- b) Distribuir volúmenes de 10 mL del medio en tubos de ensayo, conteniendo es su interior tubos de Durham invertidos, tapar con tapones de acero inoxidable y esterilizar en autoclave a 121°C durante 15 minutos. El medio ya preparado puede almacenarse a temperatura ambiente en un lugar limpio y libre de polvo, durante no más de una semana.

A.9.5 Determinación de la presencia de coliformes fecales

A.9.5.1 Prueba directa (medio A-1) (Método 9221 E.2)

La prueba directa del medio líquido A-1 es un método de un solo paso que no requiere confirmación. Sin embargo, su uso representa un mayor costo ya que este medio no se encuentra en forma deshidratada, siendo necesarios prepararlo a partir de sus ingrediente básicos (50 g de Lactosa, 20 g de Triptosa, 5 g de Cloruro de sodio, 0.5 g de Salicina, 1 mL de Eter p-isooctilfenil de polietilenglicol, 1 L de Agua destilada, 1 L).

- a) Adicionar por triplicado 1 mL de cada una de las diluciones preparadas en tubos conteniendo líquido A-1 correctamente etiquetados. Incubar durante 3 horas a $35 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$.
- b) Una vez transcurrido el tiempo los tubos se transfieren a un baño de agua a una temperatura de $44.5 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ y se incuban durante otras 21 ± 2 horas.
- c) La presencia de gas en cualquier cultivo en medio A-1 a las 24 horas o menos de incubación es una reacción positiva que indica la existencia de coliformes fecales.

A.9.5.2 Prueba indirecta (Método 9221 A.1)

Prueba presuntiva (caldo lauril-triptosa)

- a) Si se ha refrigerado el medio después de su esterilización, se incubará de un día a otro a 35°C antes de reutilizarlo.
- b) Agrúpanse los tubos de fermentación en hileras de cinco en una gradilla para tubos de ensayo.
- c) Transferir 1 mL de las diluciones seleccionadas a cada una de las series de tubos correspondientes conteniendo el caldo lauril e incubar a $35 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$.
- d) Examinar cada tubo a las 24 ± 2 horas. La acidificación, con o sin producción de gas (cambio de coloración de púrpura a amarillo), a partir de la fermentación de la lactosa en el medio de cultivo, indica una prueba presuntiva positiva de la presencia de bacterias del grupo coliformes. En caso contrario reincubar durante otras 24 horas más.
- e) Las acidificación del medio, con o sin formación de gas dentro de las 48 ± 3 horas, constituye una prueba presuntiva positiva. Cuando no existe acidificación del medio, constituye una prueba negativa.

Prueba confirmativa flama del medio EC (Método 9221E.1)

- c) Los tubos positivos de la prueba presuntiva se resiembran por triple asada (esterilizada al mechero y enfriada) en tubos de fermentación presuntiva negativa que contengan caldo EC e incubados a $44.5 \pm 0.2^\circ \text{C}$ en baño de agua.
- a) Examinar cada tubo a las 24 ± 2 horas.
- b) El resultado será positivo cuando haya producción de gas a partir de la fermentación de la lactosa contenida en el medio EC. Los tubos sin formación de gas se desechan.

A.9.6 Cálculos

El NMP de coliformes fecales se obtiene a partir del código compuesto por los tubos con resultado positivo en el medio EC o en A-1. Si se inoculan tres tubos y se utilizan volúmenes decimales diferentes a los indicados en la tabla A.12.2, se obtiene el código formado por el número de tubos con resultados positivos en las tres series consecutivas, verificando el valor del NMP correspondiente, a través de la siguiente fórmula:

$$NMP = (\text{NMP de tabla}) \times (10/\text{mayor volumen de inoculado})$$

Ec. A.9.1

Cuando el código del NMP no aparezca en tablas, se utilizará la siguiente fórmula:

$$NMP = \frac{N^\circ \text{de tubos positivos} \times 10}{\sqrt{[(\text{ml muestra tubos negativos}) \times (\text{ml de muestra total})]}}$$

Ec. A.9.2

La frecuencia de obtención de resultados que no se encuentren en las tablas debe ser baja (<1%), de otra forma se tendrá que revisar y confirmar el procedimiento de la prueba.

Tabla A.9.2: Índice del NMP y límites de aceptación del 95% para distintas combinaciones de resultados positivos cuando se usan cinco tubos por dilución (10 mL, 1.0 mL, 0.1 mL)

Combinación de positivos	Índice NMP/100 mL	Límites de confianza 95%		Combinación de positivos	Índice NMP/100 mL	Límites de confianza 95%	
		Superior	Inferior			Superior	Inferior
0-0-0	<2	-	-	4-3-0	27	12	67
0-0-1	2	1.0	10	4-3-1	33	15	77
0-1-2	2	1.0	10	4-4-0	34	16	80
0-2-0	4	1.0	13				
				5-0-0	23	9.0	86
1-0-0	2	1.0	11	5-0-1	30	10	110
1-0-1	4	1.0	15	5-0-2	40	20	140
1-1-0	4	1.0	15	5-1-0	30	10	120
1-1-1	6	2.0	18	5-1-1	50	20	150
1-2-0	6	2.0	18	5-1-2	60	30	180
2-0-0	4	1.0	17	5-2-0	50	20	170
2-0-1	7	2.0	20	5-2-1	70	30	210
2-1-0	7	2.0	21	5-2-2	90	40	250
2-1-1	9	3.0	24	5-3-0	80	30	250
2-2-0	9	3.0	25	5-3-1	110	40	300
2-3-0	12	5.0	29	5-3-2	140	60	360
3-0-0	8	3.0	24	5-3-3	170	80	410
3-0-1	11	4.0	29	5-4-0	130	50	390
3-1-0	11	4.0	29	5-4-1	170	70	480
3-1-1	14	6.0	35	5-4-2	220	100	580
3-2-0	14	6.0	35	5-4-3	280	120	690
3-2-1	17	7.0	40	5-4-4	350	160	820
4-0-0	13	5.0	38	5-5-0	240	100	940
4-0-1	17	7.0	45	5-5-1	300	100	1300
4-1-0	17	7.0	46	5-5-2	500	200	2000
4-1-1	21	9.0	55	5-5-3	900	300	2900
4-1-2	26	12	63	5-5-4	1600	600	5300
4-2-0	22	9.0	56	5-5-5	≥1600	-	-
4-2-1	26	12	65				

A.10 MÉTODO PARA LA CUANTIFICACIÓN DE SALMONELLA SPP. EN LODOS

A.10.1 Preparación del agua de dilución

El agua de dilución será preparada a como se describe en la sección A.12.1.

A.10.2 Preparación de medios de cultivo

- **Caldo tetrationato**

- a) Disolver los ingredientes o 16 g del medio, que se encuentra en forma deshidratada en el mercado, en 1 L de agua destilada y calentar hasta ebullición.
- b) Distribuir en volúmenes de 100 mL en recipientes estériles y conservados entre 5 y 8° C.
- c) Antes de usar el medio, agregar 2 mL de solución de yodo yoduro (disolver 6 g de yoduro de potasio en 20 mL de agua destilada y agregar lentamente 6 g de cristales de yodo hasta su completa disolución) y 1 mL de solución de verde brillante 1:1000 por cada 100 mL de caldo, a cada recipiente. Una vez que la solución de yodo yoduro ha sido adicionada al medio, éste deberá ser utilizado de forma inmediata. Nunca se debe volver a calentar.

- **Caldo selenito cistina**

- a) Disolver los ingredientes o 23 g del medio que se encuentra en forma deshidratada en el mercado, en 1 L de agua destilada.
- b) Calentar hasta ebullición durante 10 minutos en un baño de agua y distribuir en volúmenes de 10 ml en tubos de ensayos, para esterilizar 10 minutos por arrastre de vapor.
- c) Verificar que el pH sea de 7 ± 0.2 , en caso contrario ajustar con una solución de hidróxido de sodio 0.1 N. El medio se debe utilizar el mismo día de su preparación.

- **Agar SS**

- a) Suspender los ingredientes o 60 g del medio que se encuentra en forma deshidratada en el mercado, en 1L de agua destilada y calentar a ebullición hasta disolución completa.
- b) No esterilizar en autoclave. Posteriormente verificar que el pH sea de 7.0 ± 0.2 , en caso contrario ajustarlo con una solución de hidróxido de sodio 0.1 N.
- c) Enfriar a no menos de 50° C pero debajo de 60° C y distribuir en cajas Petri.

- **Agar sulfito de bismuto**

- a) Suspender los ingredientes o 52 g del medio, que se encuentra en forma deshidratada en el mercado, en 1L de agua destilada, calentar hasta su disolución, agitando frecuentemente.

- b) Verificar que el pH sea de 7.6 ± 0.2 en caso contrario ajustarlo con una solución de hidróxido de sodio 0.1 N. Enfriar a 60°C y distribuir en cajas Petri estériles. El medio no debe esterilizarse en autoclave, el sobrecalentamiento afecta su selectividad.

A.10.3 Enriquecimiento

- a) Suspender X g de materia fresca que correspondan a 4 g de sólidos totales en 36 ml de caldo tetrationato, obteniendo una dilución de 10^{-1} .
- b) Mezclar durante 2 o 3 minutos, con ayuda de una parrilla de agitación, a baja velocidad (800 rpm) hasta la completa dilución.
- c) Incubar durante 22 ± 2 horas a $37^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$

A.10.4 Preparación de diluciones

- a) Una vez transcurrido el tiempo de incubación, preparar las diluciones decimales seriadas transfiriendo 1 ml de caldo de tetrationato en 9 ml de agua de dilución (10^{-2}) y así sucesivamente hasta obtener la dilución deseada.
- b) En cada dilución se debe homogeneizar perfectamente agitando 25 veces en 7 segundos, haciendo un arco con la muñeca de 30 cm de arriba a abajo o con un sistema de agitación que proporcione resultados equivalentes. Es importante efectuar la agitación siempre de la misma manera, para obtener resultados comparables y utilizar una pipeta estéril diferente para cada una de las diluciones decimales subsecuentes.

A.10.5 Prueba de presencia de Salmonella spp.

- a) Adicionar por triplicado 1 ml de cada una de las diluciones preparadas en tubos conteniendo caldo selenito cistina correctamente etiquetados. Para aforar el líquido de la pipeta, deberá aplicarse la punta de ésta en el interior del cuello manteniéndola en posición vertical, inclinando el tubo. Nunca se debe introducir en la muestra, más de la tercera parte de la pipeta.
- b) Incubar durante 24 ± 2 horas a $41^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$.
- c) Realizar la observación del virado de coloración, considerando un color anaranjado intenso como positivo de la prueba correspondiente.

A.10.6 Aislamiento de Salmonella spp.

El aislamiento no son indispensables para la cuantificación de Salmonella spp., pero son necesarios como control para el laboratorio de que las bacterias fueron correctamente identificadas.

- a) A partir de un cierto número de tubos positivos (con virado anaranjado), con la ayuda de un asa, sembrar por estría para obtener colonias aisladas sobre la superficie de placas de alguno de los medios diferenciales selectivos. Los medios utilizados pueden ser agar verde brillante, agar sulfito de bismuto, agar XLD, agar SS.
- b) Incubar a 35°C durante 24 horas.

- c) Observar los cultivos para identificar las colonias sospechosas para *Salmonella* spp. como sigue:

Agar SS : colonias translúcidas, transparentes u opacas y algunas veces con centro negro.

Agar bismuto de sulfito : colonias negras con o sin brillo metálico, rodeadas de un halo café que posteriormente se transforma en negro.

A.10.7 Cálculos

El NMP de *Salmonella* spp. se obtiene a partir del código compuesto por los tubos con resultado positivo en el caldo de selenito cistina. Si se inoculan tres series de tres tubos y se utilizan volúmenes decimales diferentes a los indicados en tablas, se obtienen el código formado por el número de tubos con resultados positivos en las tres series consecutivas, verificando el valor del NMP correspondiente, a través de la ecuación A.12.1. Cuando se inoculan más de tres volúmenes decimales, para la composición del código se utilizan los resultados positivos correspondiente a tres series consecutivas inoculadas.

La densidad de *Salmonella* spp. se expresa como NMP de coliformes por g de materia seca o ST, el cual se obtiene a partir de la tabla A.12.2, la cual incluyen los límites de confianza al 95% para cada una de las combinaciones de tres series de tubos positivos posibles. En ocasiones algunos de los posibles resultados de tubos múltiples son omitidos de las tablas del NMP. Cuando el código del NMP no aparezca en tablas, se utilizará la ecuación A.12.2.

A.11 MÉTODO PARA LA CUANTIFICACIÓN DE HELMINTOS EN LODOS

A.11.1 Preparación de soluciones

- Solución de ácido alcohol: Homogeneizar 650 ml de ácido sulfúrico 0.1 N con 350 ml de alcohol etílico. Almacenar la solución en un recipiente hermético.
- Solución de formalina al 0.5%: Añadir 5 ml de formaldehído al 37% y aforar a 1L con agua destilada. Homogeneizar y almacenar en recipientes herméticos.
- Solución patrón de acetato-acético: Agregar 15 g de acetato de sodio trihidratado, 3.6 ml de ácido acético y aforar a 1 L de agua destilada. Homogeneizar y almacenar en frasco hermético durante 2 a 3 meses.
- Solución de sulfato de zinc con gravedad específica de 1.3: Disolver 800 g de sulfato de zinc heptahidratado en 1 L de agua destilada, mezclar en la parrilla magnética hasta homogeneizar totalmente. Medir la densidad con el densímetro y, según sea el caso, ajustar la densidad a 1.3 agregando sulfato de zinc o agua destilada, según se requiera. Almacenar en recipiente hermético y verificar densidad cada mes.
- Tween 80 al 0.1%: Añadir 1 ml del reactivo en 999 mL de agua destilada y homogeneizar en parrilla de agitación hasta completa disolución. Almacenar en recipiente hermético durante 2 a 3 meses.

A.11.2 Concentración y separación de los huevos de helminto.

- Tomar X gramos de materia fresca (húmeda) que corresponda a 10 g de materia seca.

- b) Filtrar la muestra sobre un tamiz de 160 mm (micras), enjuagando también el recipiente donde se encontraba originalmente la muestra y lavar enseguida con 5 litros de agua (potable o destilada).
- c) Recibir el filtrado en el mismo que contenía la muestra.
- d) Dejar sedimentar durante 3 horas o toda la noche.
- e) Aspirar el sobrenadante al máximo y depositar el sedimento en una botella de centrifuga de 250 ml, incluyendo de 2 a 3 enjuagues del recipiente que contenía a la muestra.
- f) Centrifugar a 400 g por 3 minutos (1,400-2,000 rpm por 3 minutos, según la centrifuga).
- g) Decantar el sobrenadante por vacío (asegurarse de que exista la pastilla de sedimento) y resuspender la pastilla en 150 ml de ZnSO_4 con una densidad de 1.3.
- h) Homogeneizar la pastilla con el agitador automático, o aplicador de madera.
- i) Centrifugar a 400 g por 3 minutos (1,400-2,000 rpm por 3 minutos).
- j) Recuperar el sobrenadante vertiéndolo en un frasco de 2 litros y diluir cuando menos en un litro de agua destilada.
- k) Dejar sedimentar 3 horas o toda la noche.
- l) Aspirar al máximo el sobrenadante por vacío y resuspender el sedimento agitando, verter el líquido resultante en 2 tubos de centrifuga de 50 ml y lavar de 2 a 3 veces con agua destilada el recipiente de 2 litros.
- m) Centrifugar a 480 g por 3 minutos (2,000-2,500 rpm por 3 minutos, según la centrifuga).
- n) Reagrupar las pastillas en un tubo de 50 ml y centrifugar a 480 g por minutos (2,000-2,500 rpm por 3 minutos).
- o) Resuspender la pastilla en 15 ml de solución de alcohol-ácido (H_2SO_4 0.1 N) + $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ a 33-35% y adicionar 10 ml de éter etílico.
- p) Agitar suavemente y abrir de vez en cuando los tubos para dejar escapar el gas (considerar que el éter es sumamente inflamable y tóxico).
- q) Centrifugar a 660 g por 3 minutos (2,500-3,000 rpm por 3 minutos, según la centrifuga).
- r) Aspirar al máximo el sobrenadante para dejar menos de 1 ml de líquido, homogeneizar la pastilla y proceder a cuantificar.

A.11.3 Identificación y cuantificación de la muestra

- a) Distribuir todo el sedimento en una celda de Sedgwich-Rafter o bien en una cámara de conteo de Doncaster.
- b) Realizar un barrido total al microscopio.

A.11.4 Cálculos

Para determinar los rpm de la centrifuga utilizada, la fórmula es:

$$rpm = \sqrt{\frac{Kg}{r}} \quad \text{Ec. A.11.1}$$

donde:

g : fuerza relativa de centrifugación
K : constante cuyo valor es 89,456
R : radio de la centrífuga en cm

La fórmula para calcular g es:

$$g = \frac{r(rpm)^2}{K}$$

Para expresar los resultados en número de huevecillos por litro, es importante tomar en cuenta el volumen y tipo de la muestra analizada.

ANEXO B:

**ESTÁNDARES Y NORMATIVAS PARA EL
USO Y MANEJO DE LODOS DE AGUAS
RESIDUALES**

Tabla B.1: Frecuencia de monitoreo de la calidad de los lodos

Acumulación de lodo (ton/año)	Frecuencia de Monitoreo	Parámetro a determinar
$0 < x < 290$	Una vez al año	Metales Pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos
$290 \leq x < 1500$	Una vez por trimestre (cuatro veces al año)	Metales Pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos
$1500 \leq x < 15000$	Una vez por bimestre (seis veces al año)	Metales Pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos
$15000 \leq x$	Una vez por mes (doce veces al año)	Metales Pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos

Observaciones: Después de dos años de monitoreo se puede reducir la frecuencia de monitoreo de lodos.

Fuente: Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge. 40 CFR parts 503. Environmental Protection Agency USA. Federal Register March 28, 2001. Tabla 1, sec. 503.16

Tabla B.2 : Preservación y tiempo máximo de análisis para lodos provenientes de aguas residuales.

Parámetro	Preservación *	Tiempo máximo de análisis
Coliformes fecales y Salmonella spp.	4° C	24 horas
Huevos de Helmintos	4° C	30 días
Arsénico, cadmio, cobre, cromo, níquel, plomo y zinc	4° C	6 meses
Mercurio	4° C	25 días
Sólidos totales y volátiles	4° C	7 días
Tasa específica de absorción de oxígeno **	No requiere	Inmediato
Nitrógeno total Kjeldahl, Nitrógeno amoniacal, Nitrato	4° C	28 días

* A partir de su toma y hasta antes de iniciar el análisis, la muestra debe mantenerse en refrigeración.

** Si la muestra es tomada en el laboratorio, debe mantenerse la temperatura constante o ambiente durante el transporte y analizarla inmediatamente.

Fuente: Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental- Lodos y Biosólidos- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Anexo I-sección 4.4

Tabla B.3 : Límites máximos de patógenos y parásitos en lodos de aguas Residuales

Clase	Coliformes fecales NMP/g en base seca	Salmonella sp. NMP/4 g base seca	Huevos de Helmintos/ 4g en base seca
A	< 1000	< 3	< 1 *
B	< 2,000,000**		

* Huevos de helmintos viables

** Media geométrica de la densidad de coliformes fecales, producto del análisis de un número de muestra no inferior a siete.

Fuente: Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge. 40 CFR parts 503. Environmental Protection Agency USA. Federal Register March 28, 2001. Tabla 1, sec. 503.16

Tabla B.4 : Concentración de metales y tasas de carga (Base en peso seco)

Componente	Concentración límite, mg/Kg	Tasa de carga acumulativa del componente, kg/ha	Concentración del componente para una calidad excepcional, mg/kg	Tasa de carga anual del componente, kg/ha.año
Arsénico	75	41	41	2.0
Cadmio	85	39	39	1.9
Cobre	4300	1500	1500	75
Plomo	840	300	300	15
Mercurio	57	17	17	0.85
Molibdeno	75			
Níquel	420	420	420	21
Selenio	100	100	100	5.0
Zinc	7500	2800	2800	140

Fuente: Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge. 40 CFR parts 503. Environmental Protection Agency USA. Federal Register March 28, 2001, sección 503.13, tablas 1, 2, 3 y 4.

Tabla B.5 : Tasas máximas de aplicación de lodos

Tipos de usos	Tasa máxima Ton/há.año (base seca)
Suelos agrícolas y forestales, incluyendo suelos erosionados con potencial de uso agrícola inmediato	15
Césped, jardines y áreas verdes	2
Suelos degradados sin potencial de uso agrícola inmediato (recuperación de cárcavas para generar capa vegetal o para estabilizar estructuras riesgosas)	30

Fuente: Manejo de lodos no peligrosos generados en plantas de tratamiento de aguas. Comisión Nacional del Medio Ambiente. República de Chile, 2000. Artículo 19, tabla 3

ANEXO C:

NORMA TÉCNICA PARA UNIDADES DE MAMPOSTERÍA DE ARCILLA COCIDA, LADRILLOS Y BLOQUES CERÁMICOS

Tabla C.1: Propiedades Físicas de las Unidades de Mampostería Estructural

TIPO	RESISTENCIA MINIMA A LA COMPRESION Pa(Kgf/cm ²)		ABSORCIÓN DE AGUA MÁXIMA EN %			
	PROMEDIO 5 U	UNIDAD	INTERIOR		EXTERIOR	
			PROMEDIO 5 U	UNIDAD	PROMEDIO 5 U	UNIDAD
PH	5.0 (50)	3.5 (35)	13	16	13.5	14
PV	18.0 (180)	15.0 (150)	13	16	13.5	14
M	20.0 (200)	15.0 (150)	13	16	13.5	14

Unidad de mampostería estructural: Se diseñan y fabrican para construcciones de tipo estructural, además de sus propio peso pueden soportar otras cargas.

PH: Unidad de mampostería de perforación horizontal (bloque)

PV: Unidad de mampostería de perforación vertical (ladrillo)

M: Unidad de mampostería maciza (ladrillo)

Tabla C.2: Propiedades Físicas de las Unidades de Mampostería No Estructural

TIPO	RESISTENCIA MINIMA A LA COMPRESION Pa(Kgf/cm ²)		ABSORCIÓN DE AGUA MÁXIMA EN %			
	PROMEDIO 5 U	UNIDAD	INTERIOR		EXTERIOR	
			PROMEDIO 5 U	UNIDAD	PROMEDIO 5 U	UNIDAD
PH	35.0 (30)	2.0 (20)	13	16	13.5	14
PV	14.0 (140)	10.0 (100)	13	16	13.5	14
M	14.0 (140)	10.0 (100)	13	16	13.5	14

Unidad de mampostería no estructural: Se utilizan para muros divisorios, únicamente atienden las cargas debidas a su propio peso.

PH: Unidad de mampostería de perforación horizontal (bloque)

PV: Unidad de mampostería de perforación vertical (ladrillo)

M: Unidad de mampostería maciza (ladrillo)

ANEXO D:

**FOTOGRAFÍAS DE LA PTAR DE LA CCN Y
DE LOS TRABAJOS EXPERIMENTALES
REALIZADOS**



Fotografía 1.- Criba Rotatoria



Fotografía 2.- Pila de preacidificación



Fotografía 3.- Vista del Reactor Anaerobio y Pila de Acidificación



Fotografía 4.- Reactor Anaerobio



Fotografía 5.- Chimenea de Combustión de Gases



Fotografía 6.- Separador Lamello



Fotografía 7.- Pila de lodos activados



Fotografía 8.- Clarificador de la pila de Lodos Activados



Fotografía 9.- Pila de aireación



Fotografía 10.- Biofiltro



Fotografía 11.- Granja de Peces



Fotografía 12.- Efluente de la PTAR de la CCN



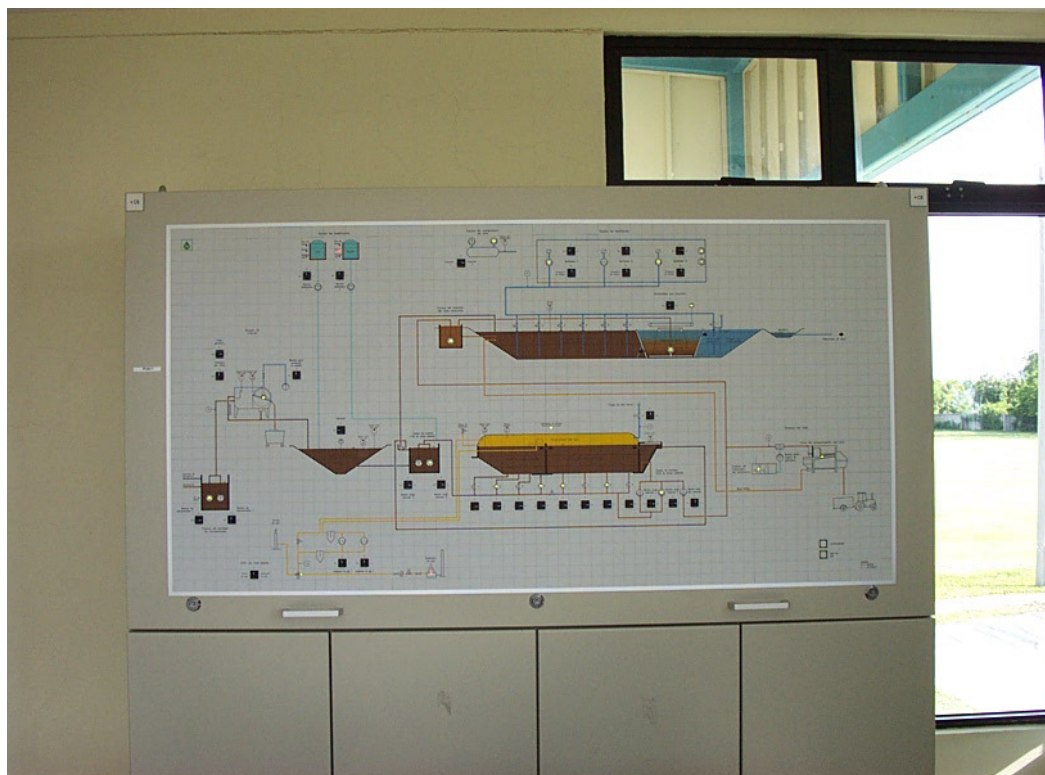
Fotografía 13:- Compactadora de lodos



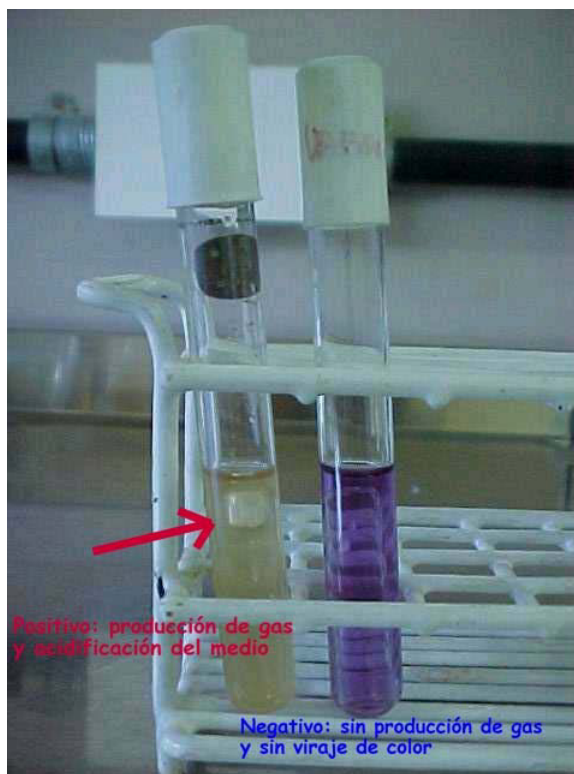
Fotografía 14.- Contenedor de lodos



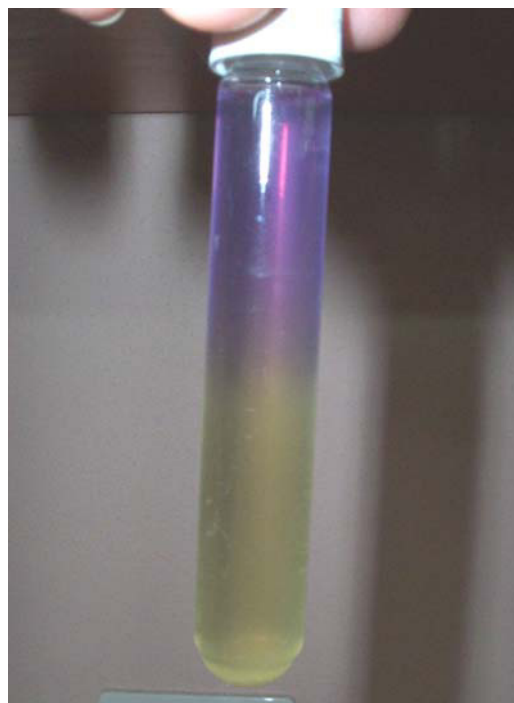
Fotografía 15.- Laboratorio para el análisis de parámetros



Fotografía 16.- Panel de Control



Fotografía 17.- Resultados de la Prueba de Coliformes por Medio del Método de Tubos Múltiples



Fotografía 18.- Producción de Gas en uno de los Tubos de la Serie a Dilucción 10^{-3}



Fotografía 19.- Resultado Positivo de la Prueba Confirmativa con Caldo EC.



Fotografía 20.-Vista de las materia prima para ladrillos a escala de laboratorio (izquierda- lodos seco, derecha-arcilla seca)



Fotografía 21.- Prueba Preliminar para Evaluar la Efectividad del Lodo como Materia Prima de Materiales de Construcción



Fotografía 22.- Piezas Fabricadas con 100% Arcilla Luego de la Etapa de Cocción (Prueba Preliminar)



Fotografía 23.- Molde de Ladrillos a Escala de Laboratorio



Fotografía 24.- Ladrillos Luego de la Etapa de Secado, se aprecia la disminución de volumen



Fotografía 25.- Ladrillo Fabricado con un Mezcla de 20% Lodo y 80% Arcilla



Fotografía 26.- Vista del la Prueba de Compresión a los Ladrillos Fabricados a Escala de Laboratorio